



**André Martins Lopes**

Licenciatura em Engenharia Civil

## **Avaliação da degradação de vias férreas**

Caracterização do balastro com recurso ao Radar de Prospeção

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Ramo de Estruturas e Geotecnia

Orientadora: Doutora Simona Fontul, Professora Auxiliar Convidada

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Rui Micaelo  
Arguente: Prof. Doutor José Varandas  
Vogal: Prof. Doutora Simona Fontul



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**setembro de 2013**



## **AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE VIAS FÉRREAS**

### **CARACTERIZAÇÃO DO BALASTRO COM RECURSO AO RADAR DE PROSPEÇÃO**

Copyright © André Martins Lopes, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## Agradecimentos

O presente trabalho é o culminar de mais um objetivo académico e de vida a que me propus sob a orientação da Professora Doutora Simona Fontul, que expresso os meus sinceros agradecimentos.

Todo o equipamento utilizado na realização deste trabalho, assim como o espaço onde foram realizados os ensaios laboratoriais, cedidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, entidade à qual o autor gostaria de agradecer, na pessoa do Investigador Principal Eduardo Fortunato.

À REFER pelo sistema de Radar de prospeção cedido e pela autorização para a publicação de resultados.

O autor gostaria ainda de agradecer ao Técnico Profissional Especialista Rui Miguel Ribeiro Coelho e à Engenheira Francesca de Chiara, pela colaboração e acompanhamento dos ensaios em laboratório, sempre com empenho e dedicação.

O meu último agradecimento é dirigido aos meus avós, avó N. Saraiva e avô José, pela oportunidade, pelos sacrifícios e pelo apoio na realização de mais uma etapa da minha vida académica.



## Resumo

---

Nas infraestruturas ferroviárias, o balastro tem um papel fundamental no funcionamento da via e na segurança que este proporciona aos utilizadores. Tendo em conta a grande importância que este elemento tem nos caminhos-de-ferro, é necessário a sua manutenção, prevenindo assim a degradação e contaminação.

Para avaliar a condição em contínuo deste material, o Radar de prospeção representa uma ferramenta importante, na identificação de zonas que precisam de intervenções. Com esta dissertação pretende-se contribuir para uma melhor localização dessas zonas de uma maneira mais expedita através da utilização do Radar de prospeção e de um conhecimento mais aprofundado da variação das constantes dielétricas do balastro.

Neste trabalho apresentam-se os princípios de funcionamento do Radar de prospeção, as diferentes aplicações do equipamento e as particularidades da utilização deste em infraestruturas ferroviárias.

Foram realizados ensaios em laboratório, em modelos físicos, para determinação da constante dielétrica do balastro ferroviário em várias condições. Apresentam-se os resultados dos diversos casos de estudo, realizados em materiais, com diferentes níveis de contaminação e de teores em água.

Foram analisadas medições “*in situ*” com o Radar de prospeção, em linhas em funcionamento com balastro em diferentes estados de contaminação, onde foram também realizados poços para medição da espessura e avaliação da condição do balastro.

Apresentam-se os principais resultados obtidos, algumas recomendações na utilização do Radar de prospeção na avaliação do balastro ferroviário, juntamente com a necessidade de desenvolvimentos futuros.

Palavras-chave: Radar de prospeção (GPR), constante dielétrica, ensaios não destrutivos, balastro, infraestruturas ferroviárias.

---





# Abstract

---

In the railway infrastructure, the ballast has an important role in the track structural stability and safety provided to users. Given the great importance of this element in railways, it is crucial to maintain and to prevent its degradation and contamination.

The use of non-destructive tests such as Ground Penetrating Radar represents an important tool for the evaluation of ballast condition and detection of areas that require maintenance. This study intends to contribute for a better location of fouled areas, in a more efficient and reliable way, using different antennas of GPR equipment.

In this study, the principles of GPR functioning are presented, as well as the main applications and the specificity of the use of this equipment to railway evaluation.

Laboratory tests were set up and performed on physical models, in order to measure the dielectric constant for different ballast conditions. Results are presented and analyzed for various case studies with different fouled levels and water contents, simulating the “*in situ*” conditions.

Also, GPR “*in situ*” tests undertaken on existing railway were analyzed. Test pits were performed in order to measure the layer thickness and to evaluate the ballast condition.

The main results obtained so far, are presented, together with troubleshooting and recommendation of GPR application to ballast evaluation. Some future developments are also referred.

Keywords: Ground Penetrating Radar (GPR), dielectric constant, non-destructive testing, ballast, railways.

---



# ÍNDICE

1	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento do trabalho .....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Organização da dissertação.....	2
2	Vias Férreas balastradas.....	5
2.1	Balastro e sua degradação.....	5
2.2	Parâmetros para avaliação da contaminação do balastro .....	6
2.2.1	Índice de contaminação (FI) .....	6
2.2.2	Percentagem de contaminação nos vazios (PVC).....	7
2.2.3	Índice relativo da contaminação do balastro ( $R_{b-f}$ ) .....	7
2.3	Inspeção automática da via.....	8
2.3.1	Introdução.....	8
2.3.2	Veículo de injeção de via EM 120 – descrição geral .....	8
2.3.3	Inspeção da geometria da via .....	9
2.3.4	Avaliação da qualidade da via com base nos parâmetros geométricos .....	12
2.3.5	Medição do perfil transversal do carril.....	14
2.3.6	Medição do perfil transversal da via.....	15
2.3.7	Medição das camadas da infraestrutura com o Radar de prospeção.....	15
3	Radar de prospeção .....	17
3.1	Histórico.....	17
3.2	Funcionamento.....	18
3.3	Equipamentos.....	23
3.4	Aplicações do Radar de prospeção .....	25
3.5	Aplicações na avaliação de infraestruturas ferroviárias.....	26
4	Avaliação das constantes dielétricas em laboratório.....	29
4.1	Introdução.....	29
4.2	Caracterização dos materiais .....	30
4.3	Preparação dos modelos físicos .....	32
4.3.1	Síntese dos ensaios realizados.....	32

4.3.2	Estudo do balastro limpo - Caso de estudo 1 .....	32
4.3.3	Estudo do solo - Caso de estudo 2 .....	34
4.3.4	Estudo do balastro contaminado - Caso de estudo 3 .....	35
4.4	Equipamento utilizado .....	38
4.4.1	SIR 20 (GSSI) e antenas suspensas .....	38
4.4.2	SIR 10H (GSSI) e antenas em contato com a superfície.....	40
4.4.3	IDS e antena suspensa .....	42
4.5	Metodologia para avaliação das constantes dielétricas .....	43
4.6	Realização de ensaios e análises dos resultados .....	44
4.6.1	Estudo do balastro limpo – Caso de Estudo 1 .....	44
4.6.2	Estudo do solo – Caso de estudo 2 .....	47
4.6.3	Estudo do balastro contaminado – Caso de estudo 3.....	49
4.7	Cuidados a ter em conta na medição.....	57
4.7.1	Sistema GSSI (SIR – 10H) e antenas em contato com a superfície.....	58
4.7.2	Sistema GSSI (SIR – 20) e antenas suspensas .....	59
4.7.3	Sistema IDS.....	60
4.8	Cuidados na interpretação de ensaios “ <i>in situ</i> ” .....	61
5	Realização de ensaios “ <i>in situ</i> ” .....	65
5.1	Enquadramento dos ensaios.....	65
5.2	Linha com balastro muito contaminado – linha de mercadorias .....	65
5.3	Linha renovada recentemente – linha de mercadorias .....	74
5.4	Linha existente com balastro contaminado – linha mista.....	76
5.5	Considerações finais .....	78
6	Conclusões e desenvolvimentos futuros .....	79
6.1	Principais conclusões .....	79
6.2	Desenvolvimentos futuros .....	81
	Bibliografia .....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Contaminação da camada de balastro (Fortunato, 2005) .....	6
Figura 2.2. EM 120 – Veículo de inspeção geométrica de via da REFER (REFER, 2008).....	9
Figura 2.3. Aspeto do interior da cabine do VIV EM120 (Fontul, 2013) .....	9
Figura 2.4. Localização do equipamento de análise da geometria da via (REFER, 2001) .....	10
Figura 2.5. Computadores de armazenamento e tratamento de dados (REFER, 2008).....	10
Figura 2.6. Gráfico dos parâmetros geométricos (Fontul, 2013) .....	11
Figura 2.7. Relatório dos índices de qualidade (REFER, 2001) .....	12
Figura 2.8. Classificação dos diversos troços da via com base no desvio padrão (REFER, 2008) .....	13
Figura 2.9. Imagens da medição do perfil transversal do carril (REFER, 2008).....	14
Figura 2.10. Gráfico do perfil transversal da via (REFER, 2008).....	15
Figura 3.1. Princípio de funcionamento do georadar (Fernandes & Lourenço, 2007).....	21
Figura 3.2. Sistemas do georadar que foram utilizados; a) sistema GSSI (500 e 900 MHz); b) sistema IDS; c) Sistema GSSI (1 e 1,8 GHz).....	23
Figura 3.3. Modelo biestático do funcionamento do sistema do georadar (Fernandes & Lourenço, 2007) .....	24
Figura 4.1. Curva granulométrica do balastro limpo utilizado nos ensaios.....	30
Figura 4.2. Curva granulométrica do solo utilizado nos ensaios.....	30
Figura 4.3. Gráfico com o fuso de controlo do balastro e curva granulométrica obtida (Fontul & Fortunato, 2010).....	31
Figura 4.4. Material de confinamento do reservatório aquando da compactação .....	33
Figura 4.5. Modelo com a folha de alumínio para o caso de estudo 1 .....	33
Figura 4.6. Fases adotadas para realização do ensaio com as antenas.....	34
Figura 4.7. Modelo da caixa utilizada para o caso de estudo 2 .....	34
Figura 4.8. Equipamentos para determinação do teor em água; a) ensaio da garrafa; b) Gamadensímetro (TROXLER).....	35
Figura 4.9. Curvas granulométricas relativas a cada índice de contaminação, com o fuso granulométrico para balastro contaminado (Fortunato, 2005) .....	37
Figura 4.10. Sistemas utilizados para apoio das antenas de 1,0 GHz e de 1,8 GHz para cada caso de estudo; a) Balastro limpo; b) Balastro contaminado; c) Solo.....	39

Figura 4.11. Janela de visualização que foi utilizada, com a reflexão da superfície e do alumínio do fundo da caixa; a) antenas de 1 GHz; b) antenas de 1,8 GHz; .....	40
Figura 4.12. Janela de visualização que foi utilizada, com a reflexão da superfície e do fundo da caixa; a) antena de 500 MHz; b) antena de 900 MHz;.....	41
Figura 4.13. Medições feitas com o equipamento IDS e exemplo de registos recebidos; a) antena apoiada; b) antena suspensa.....	42
Figura 4.14. Molhagem do balastro e sua compactação para o caso de estudo do balastro limpo.....	45
Figura 4.15. Variação da constante dielétrica para as diferentes etapas do caso de estudo 1 .....	45
Figura 4.16. Gráfico com a evolução da constante dielétrica, durante a secagem do balastro .....	46
Figura 4.17. Constante dielétrica do balastro limpo e seco para diferentes antenas .....	46
Figura 4.18. Equipamentos usados no estudo do solo; a) Gamadensímetro (TROXLER); b) ensaio da garrafa de areia;.....	47
Figura 4.19. Variação da constante dielétrica com o teor em água obtido através do equipamento Gamadensímetro .....	48
Figura 4.20. Variação da constante dielétrica com o teor em água obtido através do ensaio da garrafa de areia .....	49
Figura 4.21. Valores de constante dielétrica para um balastro com índice 1 e teor em água de 8,4% 50	
Figura 4.22. Variação da constante dielétrica com o teor em água para cada nível de contaminação, para as diferentes antenas utilizada .....	51
Figura 4.23. Variação da percentagem da constante dielétrica relativamente a um índice de contaminação de 6 quando se aumenta este até 55, para cada teor em água, para as diferentes antenas utilizadas .....	52
Figura 4.24. Variação da percentagem da constante dielétrica relativamente a um teor em água de 6% quando se aumenta este até 12%, para cada índice de contaminação, para as diferentes antenas utilizadas .....	53
Figura 4.25. Valores de constante dielétrica, para um balastro índice 55 encharcado e sua secagem .....	54
Figura 4.26. Evolução do desvio padrão para cada antena, quando se varia o teor em água, para cada índice de contaminação .....	55
Figura 4.27. Variação das constantes dielétricas para cada antena, tendo em consideração um balastro granítico .....	56
Figura 4.28. Diferença que existe entre as antenas da IDS (suspensa) e as outras antenas, quando se compara as constantes dielétricas.....	56

Figura 4.29. Valor das constantes dielétricas, para diferentes índices de contaminação a para o mesmo teor em água (8%) .....	57
Figura 4.30. Visualização da mudança da posição da janela que se executou para visualizar corretamente a superfície da amostra .....	58
Figura 4.31. Exemplo de redução de uma janela de visualização, de maneira a termos o essencial .	59
Figura 4.32. Exemplo da troca de sentido de uma das antenas.....	59
Figura 4.33. Exemplo da troca de sinal no registo, quando se troca o sentido a uma das antenas ....	60
Figura 4.34. Determinação automática da localização da superfície (topo da travessa) .....	61
Figura 4.35. Gráfico com a variação da espessura com a variação da constante .....	62
Figura 4.36. Gráfico com a diferença/variação da espessura para cada tipo de balastro, variando a constante.....	63
Figura 5.1. Curva granulométrica do balastro contaminado .....	66
Figura 5.2. Curva granulométrica do balastro muito contaminado .....	66
Figura 5.3. Curvas granulométricas dos dois balastros, com o fuso proposto por Fortunato, em 2005 .....	67
Figura 5.4. Evolução do desvio padrão nas cinco campanhas para o índice de qualidade .....	68
Figura 5.5. Evolução do desvio padrão para o índice de qualidade, relativamente às duas últimas campanhas.....	69
Figura 5.6. Evolução do nivelamento longitudinal esquerdo para as duas últimas campanhas do troço em estudo .....	69
Figura 5.7. Evolução do nivelamento longitudinal direito para as duas últimas campanhas do troço em estudo .....	70
Figura 5.8. Registo feitos pelo georadar na campanha de Maio de 2013: com filtros, em cima e sem filtros, em baixo .....	70
Figura 5.9. Evolução do desvio padrão da constante dielétrica para os diferentes pontos.....	71
Figura 5.10. Registos do georadar para as três campanhas estudadas .....	71
Figura 5.11. Estudo feito para um balastro calcário, com a antena de 900 MHz, para diferentes níveis de contaminação, através de Selig (Fortunato, 2005).....	73
Figura 5.12. Visualização da espessura relativa aos três poços analisados; a) poço 1 (km 0 + 890); b) poço 2 (1 + 000); c) poço 3 (2 + 954) .....	75
Figura 5.13. Valores de constante dielétrica relativo aos três poços estudados, para as três campanhas e a constante dielétrica obtida em laboratório para a antena da IDS, suspensa .....	76
Figura 5.14. Visualização dos poços executados. a) Poço 1, b) Poço 2 .....	76

Figura 5.15. Evolução das constantes dielétricas, relativas aos dois poços .....	77
--	----



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. Categorias de contaminação do balastro baseadas nos diferentes índices (Indraratna, et al., 2011) .....	8
Quadro 2.2. Índice de qualidade da via (REFER, 2008).....	12
Quadro 3.1. Lista da condutividade de diferentes materiais (blogspot, 2008).....	19
Quadro 3.2. Constante dielétrica de diferentes materiais (Lourenço, 2012) (Ulriksen, 1982).....	22
Quadro 3.3. Relação entre a frequência de uma antena e a sua profundidade de penetração (Fernandes & Lourenço, 2007) .....	25
Quadro 4.1. Tabela com o resumo dos ensaios feitos.....	32
Quadro 4.2. Categorias de contaminação do balastro baseadas nos diferentes índices (Indraratna, et al., 2011) .....	35
Quadro 4.3. Índices de contaminação admitidos .....	36
Quadro 4.4. Valores de constantes dielétricas obtidas durante a secagem do balastro limpo .....	46
Quadro 4.5. Valores da constante dielétrica para diferentes teores em água obtidos pelo equipamento Gamadensímetro .....	47
Quadro 4.6. Valores da constante dielétrica para diferentes teores em água obtidos pelo equipamento Gamadensímetro .....	48
Quadro 4.7. Valores da constante dielétrica para diferentes teores em água obtidos pelo ensaio da garrafa de areia.....	48
Quadro 4.8. Valor das constantes dielétricas obtidas para os diferentes índices de contaminação e para diferentes teores em água, para a antena da IDS, suspensa. ....	50
Quadro 4.9, Valor das constantes dielétricas para diferentes índices de contaminação e para o mesmo teor em água (8%), para a antena da IDS, suspensa .....	57
Quadro 5.1. Valores relativos à massa volúmica das partículas secas, para um balastro contaminado e um balastro muito contaminado .....	67
Quadro 5.2. Valores dos índices de contaminação para os dois tipos de balastro .....	68
Quadro 5.3. Constantes dielétricas e desvio padrão para os diferentes pontos .....	71
Quadro 5.4. Constantes dielétricas e desvio padrão para os diferentes pontos .....	72
Quadro 5.5. Transformação do índice de Indraratna, no índice de Selig .....	73
Quadro 5.6. Valores de constante dielétrica para um balastro granítico com 6% de água, através da antena de 900 MHz e para os diferentes índices de contaminação do Indraratna .....	74

Quadro 5.7. Valores de constante dielétrica para um balastro calcário seco, através da antena de 900 MHz e para os diferentes índices de contaminação de Selig, segundo o estudo feito por Fortunato em 2005.....	74
Quadro 5.8. Diferença entre valores de constante dielétrica de um balastro calcário seco e um balastro granítico com 6% de água, apresentados nas tabelas anteriores.....	74
Quadro 5.9. Evolução das constantes dielétricas nos dois poços, ao longo das campanhas .....	77

## **Símbolos e Abreviaturas**

AMP – Ataque mecânico pesado

Encoder – Sistema de contagem da distância percorrida

END – Ensaios não destrutivos;

FI – “Fouling index”

GPR – “Ground Penetrating Radar”

GPS – Sistema de posicionamento geográfico

GSSI – Geophysical Surveys Systems Inc.

IDS – Ingegneria Dei Sistemi

IMU – Unidade de medição inercial

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil;

OGMS - Unidade ótica de medição da bitola

Pk – Ponto quilométrico

PVC – “Percentage void contamination”

QN – Nível de qualidade

$R_{b-f}$  – “Relative ballast fouling ratio”

REFER – Rede Ferroviária Nacional;

TQI – Índice de qualidade

VIV – Veículo de inspeção de via

PN – Passagem de nível

AMV – Aparelho de mudança de via

AD – Aparelho de dilatação

FHWA – “Federal Highway Administration”

NP – Norma portuguesa

EN – Norma específica

QN – Nível de qualidade

$\sigma$  – Condutividade elétrica (S/m)

$K_m$  – Permeabilidade magnética

$K$  – Constante dielétrica

$w$  – Teor em água (%)

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

O surgimento dos caminhos-de-ferro data do século VI a.c. na Grécia antiga, servindo para o transporte de barcos através da utilização de escravos. Os caminhos-de-ferro surgem então na Europa, mais precisamente na Inglaterra, no século XIX, aquando a revolução industrial.

Este implementar do meio de transporte ferroviário na Europa, dá-se devido à sua capacidade de transportar grandes quantidades de carga a baixo custo, rivalizando atualmente com o transporte aéreo, no entanto, o custo para a conservação de vias férreas é bastante elevado.

Inicialmente os elementos da via-férrea eram substituídos apenas quando estes se encontravam inoperacionais, reduzindo drasticamente a segurança na linha. Hoje em dia a tendência é de aumentar o nível de comodidade dos passageiros aumentando a sua segurança, para isso, é necessário maiores exigências ao nível da estrutura e principalmente da sub-estrutura da via.

Em relação à sub-estrutura da via-férrea, existe um grande número de ensaios sobre os materiais e as camadas que a compõem, embora estes ensaios sejam realizados apenas caso se verifique anomalias na via. Devido a esse modo de atuar, existe grandes preocupações no acompanhamento da via-férrea de maneira a prever eventuais defeitos, o que poderá implicar grandes intervenções, dispendiosas e acabando por impedir a sua exploração.

Para além dos diferentes ensaios existentes, existe os ensaios não-destrutivos (END), que como o nome indica são os ensaios que não provocam qualquer dano, ou um dano impercetível na sub-estrutura da via, permitindo que estes ensaios possam ser realizados com a estrutura em utilização. Dentro destes ensaios não destrutivos, encontra-se: ultrassons, raios x, laser, métodos eletromagnéticos, ensaios de carga.

Os ensaios não destrutivos têm sido uma ferramenta comumente utilizada em diversas áreas, incluindo nos caminhos-de-ferro. Dentro destes ensaios, tem-se o Radar de prospeção, incorporado em veículos de alta velocidade, podendo inspecionar a via a grandes velocidades, fornecendo informações sobre o estado da sub-estrutura da via, e com estas informações sabe-se onde se tem de intervir.

Este equipamento tem vindo a ser utilizado tanto na Europa, como nos Estados Unidos da América, onde teve a sua primeira aplicação nas linhas férreas nos anos 70 (Hyslip, et al., 2003). Em Portugal utiliza-se em menor escala esse equipamento nas infraestruturas de transporte, pelo que até há bem pouco tempo, apenas o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) possuía este equipamento, sendo os ensaios feitos com Radar de prospeção de sua inteira responsabilidade (Pedrosa, 2009).

O seu funcionamento baseia-se no envio de impulsos eletromagnéticos para investigação do subsolo. Esses impulsos sofrerão fenómenos de reflexão, refração e difração, devido aos diferentes meios e às

suas propriedades elétrica e magnéticas. No entanto, existem limitações, tais como, a interpretação dos resultados que não é intuitivo e que muito tem sido feito para melhorar esse aspeto.

Os temas abordados neste trabalho são de uma grande contribuição, sabendo que existe a necessidade, de termos informação que ajude a localizar as zonas onde se deve intervir devido aos problemas existentes na sub-estrutura da via e que podem prejudicar o funcionamento normal da mesma.

## 1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o estado de conservação da via, através do uso do equipamento de Radar de prospeção, com diferentes sistemas e antenas com diferentes frequências. Terá como principal objetivo a determinação das constantes dielétricas dos materiais que compõem a sub-estrutura da via, fundamentalmente o balastro, estudando a variação da condição deste ao longo da via.

O tema em causa será tratado de um ponto de vista prático, recorrendo a diferentes casos de estudo que foram feitos em laboratório, e também a ensaios feitos “*in situ*”.

Estes estudos tiveram parceria da entidade portuguesa gestora da rede nacional, REFER E.P. que facultou o seu sistema do Radar de prospeção para os ensaios laboratoriais, que realizou os ensaios “*in situ*” e disponibilizou a informação.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Com a introdução apresentada, procurou-se introduzir o Radar de prospeção como ferramenta indispensável para avaliar o estado da via, apresentando depois os objetivos do trabalho.

No capítulo seguinte falou-se um pouco sobre o balastro que compõe as vias férreas balastradas e as diferentes maneiras de degradação do mesmo, mas também, sobre os principais índices que se pode ter para avaliar o estado de contaminação de uma via-férrea balastrada, falando-se um pouco sobre cada um. Falou-se ainda sobre os diferentes métodos não destrutivos, desde o EM 120 ao Radar de prospeção, incidindo mais neste último.

No capítulo três fez-se uma breve contextualização histórica sobre o Radar de prospeção, quais as suas origens, falando-se também sobre o princípio e o funcionamento do equipamento e quais as diferentes aplicações que este poderá ter, com ênfase na avaliação de infraestruturas ferroviárias.

No quarto capítulo faz-se referência aos diferentes casos de estudo que foram feitos em laboratório, fazendo uma breve descrição destes e sobre os diferentes equipamentos utilizados. Em seguida fez-se uma análise dos resultados dos diferentes casos de estudo.

No capítulo seguinte relatam-se os ensaios feitos “*in situ*”, tirando-se algumas conclusões.

No último capítulo é feito um resumo das conclusões a que chegámos, referindo os possíveis desenvolvimentos futuros.





## 2 VIAS FÉRREAS BALASTRADAS

### 2.1 BALASTRO E SUA DEGRADAÇÃO

A via balastrada é uma solução estrutural que, pelas suas características, possui um bom comportamento dinâmico, sob a circulação dos comboios, relativamente aos esforços provocados pelas massas suspensas (Fortunato, 2005). Esta característica relaciona-se com a camada de balastro, elemento onde se encontra assente a via-férrea.

O balastro, elemento fundamental no comportamento da via-férrea, é composto inteiramente por agregados uniformes angulares, geralmente graníticos. As suas principais funções são: 1) servir de suporte à via mantendo a sua geometria vertical e horizontal; 2) permitir a correção dos erros da geometria da via; 3) fornecer elasticidade à via em conjugação com outros componentes; 4) fornecer à via uma eficiente drenagem; 5) garantir a distribuição das cargas (Nurmikolu, 2012) (Fortunato, 2005) (Alemu, 2011) (Pita, 2006)

Estas funções podem ser postas em causa, no decorrer da vida útil do balastro, quando este tende a degradar-se, geralmente através da contaminação com finos.

A sua contaminação e degradação podem ser devidas a diversos fatores, tais como (Fontul, 2013):

- ❖ Tráfego – devido ao avançar das rodas dos veículos, as travessas vão levantar e baixar, existindo o impacto destas no balastro. Ocorre assim, uma sobrecarga do balastro levando-o à rotura, ao deslizamento e ao seu esmagamento e fragmentação;
- ❖ Trabalhos de conservação – existe desgaste das partículas devido às ações de manutenção da via como o ataque mecânico pesado ou o desguarnecimento;
- ❖ Contaminação com finos (de baixo para cima) – quando não existem camadas protetoras abaixo do balastro ou essas não se encontram em devidas condições;
- ❖ Contaminação com finos (de cima para baixo) – ocorre devido às ações climáticas, fundamentalmente devido às chuvas ou devido a contaminação com material transportado pelos comboios (carvão etc.).

Através destes fatores observa-se que o balastro ao longo dos anos vai sofrendo contaminação através de finos, que se acumulam nos vazios, resultando num acumular de água, reduzindo substancialmente a capacidade de drenagem do balastro.

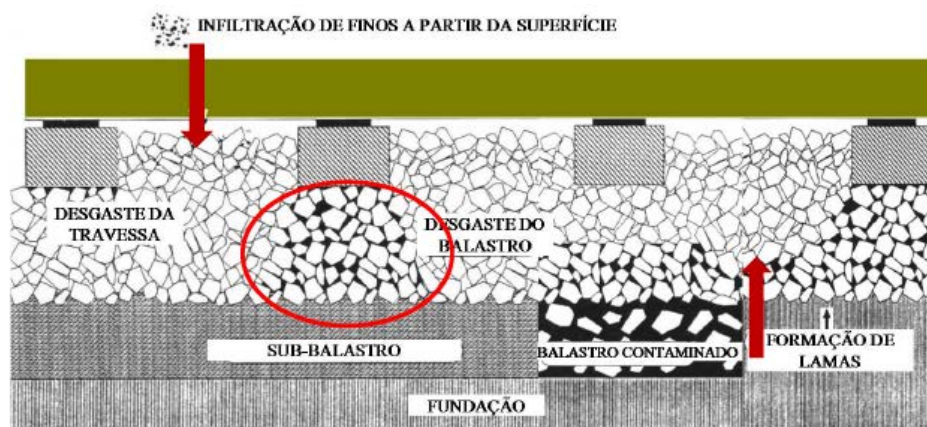


Figura 2.1. Contaminação da camada de balastro (Fortunato, 2005)

## 2.2 PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DO BALASTRO

Tendo em conta os diversos fatores que causam a degradação e contaminação do balastro mencionados anteriormente, tornou-se necessário avaliar o seu nível de contaminação.

Os parâmetros mais usados para avaliar a contaminação do balastro, são: índice de contaminação (FI), “*foulling index*” (Selig & Waters, 1994), e percentagem de contaminação nos vazios (PVC), “*percentage void contamination*” (Feldman & Nissen, 2002). Mais recentemente, um novo parâmetro foi proposto como alternativa aos primeiros dois, índice relativo da contaminação do balastro ( $R_{b-i}$ ), “*relative ballast foulling ratio*” (Indraratna, et al., 2011).

### 2.2.1 ÍNDICE DE CONTAMINAÇÃO (FI)

O índice de contaminação, parâmetro proposto por Selig e Waters em 1994, classifica a contaminação do balastro tendo em conta a granulometria do material. Este parâmetro foi desenvolvido com base em granulometrias obtidas através de amostras representativas de balastro contaminado, na América do Norte.

O índice de contaminação é dado pela seguinte expressão:

$$FI = P_4 + P_{200} \quad (1)$$

Onde:

$P_4$  – percentagem das partículas de balastro que passam no peneiro 4,75mm;

$P_{200}$  – percentagem das partículas de balastro que passam no peneiro 0,075mm;

Este parâmetro não tem em conta a densidade específica do material de contaminação (Su, et al., 2011).

### 2.2.2 PERCENTAGEM DE CONTAMINAÇÃO NOS VAZIOS (PVC)

Este parâmetro, apresentado por Feldman e Nissen em 2002, avalia o nível de contaminação tendo em conta a diminuição dos vazios no balastro, podendo ser calculado pela seguinte expressão:

$$PVC = \frac{V_2}{V_1} \times 100\% \quad (2)$$

Onde:

$V_1$  – volume de vazios entre as partículas de balastro;

$V_2$  – volume total do material de contaminação (partículas que passam no peneiro 9,5mm);

Este parâmetro não tem em conta os vazios entre as partículas de contaminação (Su, et al., 2011).

### 2.2.3 ÍNDICE RELATIVO DA CONTAMINAÇÃO DO BALASTRO ( $R_{B-F}$ )

Como alternativa aos dois parâmetros anteriores, foi proposto um novo parâmetro, o índice relativo da contaminação do balastro. Este parâmetro é calculado com base na relação entre o volume de partículas que passam no peneiro 9,5mm (material de contaminação) e as partículas de balastro (material retido no peneiro 9,5mm). Este parâmetro é definido pela seguinte expressão:

$$R_{b-f} = \frac{M_f \left( \frac{G_{b-f}}{G_{s-f}} \right)}{M_b} \times 100\% \quad (3)$$

Onde:

M e G – massa seca e densidade específica, respetivamente;

f e b – material de contaminação e balastro, respetivamente;

Para os diferentes parâmetros anteriormente mencionados, existe uma classificação dos níveis de contaminação num dado balastro, a qual é apresentada na seguinte tabela:

Quadro 2.1. Categorias de contaminação do balastro baseadas nos diferentes índices (Indraratna, et al., 2011)

<b>CATEGORIA</b>	<b>ÍNDICE DE CONTAMINAÇÃO (%)</b>	<b>PERCENTAGEM DE CONTAMINAÇÃO NOS VAZIOS (%)</b>	<b>ÍNDICE RELATIVO DA CONTAMINAÇÃO DO BALASTRO (%)</b>
LIMPO	<1	<2	<2
MODERADAMENTE LIMPO	1 a <10	2 a <9,5	2 a <10
MODERADAMENTE CONTAMINADO	10 a <20	9,5 a <17,5	10 a <20
CONTAMINADO	20 a <40	17,5 a <34	20 a <50
MUITO CONTAMINADO	≥40	≥34	≥50

## 2.3 INSPEÇÃO AUTOMÁTICA DA VIA

### 2.3.1 INTRODUÇÃO

Para garantir a circulação dos veículos em condições de conforto e segurança é necessário conhecer a condição da via-férrea. A avaliação dessa condição é realizada através da inspeção da via e de medições dos seus parâmetros geométricos, da condição do carril e mais recentemente da avaliação das camadas da infraestrutura através do Radar de prospeção. As inspeções podem ser realizadas manualmente ou automaticamente, com veículos especialmente desenvolvidos para esse efeito. A empresa Rede Ferroviária Nacional (REFER, E.P) utiliza para realização da inspeção automática o veículo EM 120. Dado o âmbito do presente estudo, será apresentado de seguida o método de inspeção automática da via utilizado em Portugal.

### 2.3.2 VEÍCULO DE INPEÇÃO DE VIA EM 120 – DESCRIÇÃO GERAL

O veículo de inspeção de via da REFER, EM 120, é um veículo com a capacidade de avaliar as condições da via de uma forma rápida e não destrutiva, podendo fazer a sua inspeção a uma velocidade de 120 km/h. O VIV EM120 consegue inspecionar os diferentes parâmetros da via comparando-os com os limites de tolerância standard, permitindo uma visualização dos mesmos em tempo real (REFER, 2001).



Figura 2.2. EM 120 – Veículo de inspeção geométrica de via da REFER (REFER, 2008)

No VIV EM 120 encontram-se instalados os seguintes sistemas de medição (REFER, 2001):

- ❖ Sistema de inspeção de geometria da via;
- ❖ Sistema de inspeção do perfil transversal do carril;
- ❖ Sistema de inspeção do perfil transversal da via;
- ❖ Sistema de inspeção da geometria da catenária;
- ❖ Sistema de avaliação das camadas da infraestrutura através de Radar de prospecção.



Figura 2.3. Aspeto do interior da cabine do VIV EM120 (Fontul, 2013)

### 2.3.3 INSPEÇÃO DA GEOMETRIA DA VIA

A inspeção da geometria da via é feita sem contacto, através de um sistema inercial, constituído pelos seguintes equipamentos (REFER, 2001):

- ❖ IMU (unidade de medição inercial): é constituído por 3 acelerómetros que medem acelerações segundo 3 eixos que formam 90° entre si, e 3 giroscópios que medem as variações angulares em torno desses mesmos eixos;

- ❖ OGMS (unidade ótica de medição da bitola): mede a distância que vai desde a projeção do centro do bogie traseiro sobre o plano onde a bitola é medida a cada um dos carris. Este sistema encontra-se integrado com o IMU na definição dos alinhamentos;
- ❖ GPS (sistema de posicionamento geográfico): indica a posição na Terra em que o veículo se encontra. Informação para nos dar a referência inicial e para aferir as medições efetuadas pela caixa inercial;
- ❖ Encoder (sistema de contagem da distância percorrida): indica a distância percorrida pelo veículo;



Figura 2.4. Localização do equipamento de análise da geometria da via (REFER, 2001)

Os dados recolhidos são armazenados e tratados em computadores e unidades de controlo instalados no EM 120.



Figura 2.5. Computadores de armazenamento e tratamento de dados (REFER, 2008)

Durante a medição são gerados gráficos, um para cada parâmetro geométrico medido, sendo geralmente mostrados os seguintes sete parâmetros:



- ❖ Nivelamento Longitudinal Esquerdo;
- ❖ Nivelamento Longitudinal Direito;
- ❖ Empeno;
- ❖ Bitola;
- ❖ Nivelamento Transversal;
- ❖ Alinhamento Esquerdo;
- ❖ Alinhamento Direito;

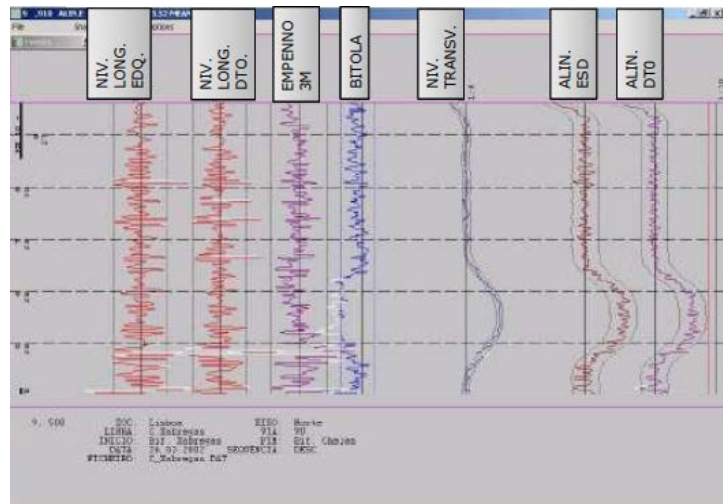


Figura 2.6. Gráfico dos parâmetros geométricos (Fontul, 2013)

A medição dos parâmetros geométricos é realizada com o espaçamento de vinte e cinco centímetros.

A escala de representação de cada parâmetro é mostrada conjuntamente com a sua identificação. No lado esquerdo do gráfico estão representados os seguintes dados: a localização da medição através do ponto quilométrico (Pk), a velocidade de circulação recomendada, bem como os eventos da via como as passagens de nível (PN), estações, aparelhos de mudança de via (AMV), aparelhos de dilatação (AD), etc..

Em rodapé é identificado o troço de via, a data da realização da medição e o ficheiro de gravação.

Além dos gráficos, é realizado também um relatório que indica os defeitos encontrados, para as tolerâncias definidas para cada parâmetro.

No relatório são apresentados os seguintes dados:

1. Via analisada;
2. Pk inicial do defeito;
3. Pk final do defeito;
4. Extensão do defeito (Pk final - Pk inicial);
5. Tipo de defeito;
6. Amplitude máxima do defeito (mm);
7. Pk onde foi detetada a amplitude máxima;
8. Classe analisada;
9. Classe onde o efeito era permitido;
10. Subclasse analisada.

Posteriormente é elaborado também o relatório sumário onde são calculados para uma dada extensão o número e extensão de defeitos existentes de cada parâmetro nas subclasses pretendidas.

As subclasses representam (REFER, 2001):

- ❖ Tolerâncias de receção de linhas novas ou renovadas;
- ❖ Tolerâncias de conservação de via;
- ❖ Tolerâncias de segurança;

## 2.3.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA VIA COM BASE NOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Para efeitos de classificação da qualidade da via era elaborado também um relatório (relatório dos índices de qualidade) onde se encontravam cinco índices de qualidade.

A classificação tendo em conta o índice de qualidade baseia-se na seguinte tabela:

ADA2 REPORT					PAGE				
0, 500		ZOC	Lisboa		EIXO	Lisboa/Setúbal M			
		LINHA	L. Alentejo		TRACK	VA			
		Início:	Barreiro		Fim:	Pinhal Novo			
		DATA:	10.09.2001		SEQUENCIA:	ASC.			
		FILENAME	BarrPNov_VA.DAT		CLASSE:	III			
-----*									
LOCATION				ADA2					
-----*									
TRACK	KILOMETER	MAX	* TAMP	LINE	TQI	GAGE	CLN		
	DE	PARA	KM/H	(00)	(00)	(00)	(00)		
-----*									
VA	0, 560	0, 750	80 *	-113	-58	-158	-67	-81	*
VA	0, 750	1, 0	80 *	-109	-54	-148	-61	-84	*
VA	1, 0	1, 123	80 *	-127	-72	-181	-72	-98	*
VA	1, 123	1, 250	80 *	-105	-59	-148	-54	-79	*
VA	1, 250	1, 500	80 *	-121	-63	-168	-65	-91	*
VA	1, 500	1, 750	80 *	-133	-54	-172	-56	-102	*
VA	1, 750	2, 0	80 *	-108	-56	-149	-60	-81	*
VA	2, 0	2, 199	80 *	-148	-76	-201	-74	-119	*
VA	2, 199	2, 250	100 *	-176	-79	-231	-51	-131	*
VA	2, 250	2, 391	100 *	-218	-59	-256	-56	-169	*
VA	2, 391	2, 500	100 *	-159	-51	-192	-42	-136	*
VA	2, 500	2, 750	100 *	-229	-67	-271	-75	-191	*

Figura 2.7. Relatório dos índices de qualidade (REFER, 2001)

Quadro 2.2. Índice de qualidade da via (REFER, 2008)

Índice de Qualidade da Via TQI	Níveis de Qualidade
$0 \leq TQI \leq 150$	Bom
$150 < TQI \leq 200$	Aceitável
$200 < TQI \leq 250$	Deficiente
$250 < TQI$	Mau



Com base nos índices de qualidade era calculado um desvio padrão que fazia a média dos valores num determinado troço, adotando um nível de qualidade. Consegue-se observar melhor, através da Figura 2.8.

Velocidade		Desvio padrão (mm)		Níveis de qualidade
Classe	[km/h]	Niv. Longitudinal	Alinhamento	
VI	$V \leq 40$	$3.3 \geq \sigma$	$2.1 \geq \sigma$	QN1
		$3.3 < \sigma < 4.29$	$2.1 < \sigma < 2.73$	QN2
		$4.29 \leq \sigma$	$2.73 \leq \sigma$	QN3
V	$40 < V \leq 80$	$3.0 \geq \sigma$	$1.8 \geq \sigma$	QN1
		$3.0 < \sigma < 3.9$	$1.8 < \sigma < 2.34$	QN2
		$3.9 \leq \sigma$	$2.34 \leq \sigma$	QN3
IV	$80 < V \leq 120$	$2.7 \geq \sigma$	$1.5 \geq \sigma$	QN1
		$2.7 < \sigma < 3.51$	$1.5 < \sigma < 1.95$	QN2
		$3.51 \leq \sigma$	$1.95 \leq \sigma$	QN3
III	$120 < V \leq 160$	$2.4 \geq \sigma$	$1.3 \geq \sigma$	QN1
		$2.4 < \sigma < 3.12$	$1.3 < \sigma < 1.69$	QN2
		$3.12 \leq \sigma$	$1.69 \leq \sigma$	QN3
II	$160 < V \leq 230$	$1.9 \geq \sigma$	$1.1 \geq \sigma$	QN1
		$1.9 < \sigma < 2.47$	$1.1 < \sigma < 1.43$	QN2
		$2.47 \leq \sigma$	$1.43 \leq \sigma$	QN3
I	$V > 230$	$1.5 \geq \sigma$	$1.0 \geq \sigma$	QN1
		$1.5 < \sigma < 1.95$	$1.0 < \sigma < 1.3$	QN2
		$1.95 \leq \sigma$	$1.3 \leq \sigma$	QN3

Figura 2.8. Classificação dos diversos troços da via com base no desvio padrão (REFER, 2008)

No entanto, o índice de qualidade global (TQI), já não é usado atualmente para a classificação qualitativa da via. A razão para tal é que, sendo o índice de qualidade dependente da velocidade de circulação na via, se baixar essa mesma velocidade, consegue-se ter sempre um índice aceitável mesmo que a via esteja em mal estado. Assim sendo, utiliza-se atualmente o desvio padrão de dois dos parâmetros medidos pelo EM120 para classificar qualitativamente a condição da via.

O desvio padrão do nivelamento longitudinal e do alinhamento longitudinal, calculado para secções de 200 m de via, é utilizado para analisar a condição da mesma. Essa análise pode ser efetuada com dois objetivos, por um lado para avaliar os níveis de qualidade da via e por outro lado para avaliação das necessidades de manutenção da via, com o objetivo de propor intervenções nesses troços, recorrendo assim ao ataque mecânico pesado (AMP) (Rodrigues, 2012).

Para o nível de qualidade (QN), é feita a média dos desvios padrão da fila esquerda e direita em cada troço de 200m, quer para o alinhamento longitudinal, quer para o nivelamento longitudinal. O QN em cada secção é assumido como o pior dos resultados, podendo ser o QN do alinhamento longitudinal ou o QN do nivelamento longitudinal.

Para avaliação da necessidade de realização do ataque mecânico pesado (AMP), consideram-se os desvios padrão dos mesmos parâmetros geométricos, calculados para cada 200 m. Salienta-se que nesse caso, escolhe-se o máximo dos desvios padrão para os dois valores obtidos (carril esquerdo ou direito) em termos de nivelamento longitudinal e, no caso do alinhamento longitudinal, o mínimo dos dois valores obtidos (carril esquerdo ou direito). Esse critério é devido ao fato do AMP não corrigir a bitola. Assim sendo, antes de se proceder a um ataque mecânico pesado deve-se primeiro fazer a

correção da bitola, acabando por os defeitos do alinhamento tornarem-se menos gravosos, daí escolher-se o menor valor do alinhamento. Também neste caso o QN em cada secção é adotado o pior dos valores, podendo ser o QN do alinhamento longitudinal ou o QN do nivelamento longitudinal. (Rodrigues, 2012)

### 2.3.5 MEDIÇÃO DO PERFIL TRANSVERSAL DO CARRIL

O sistema para medição do perfil transversal do carril é efetuado através de equipamento laser/ótico, a cada quatro metros. Com este sistema obtém-se a medição do perfil do carril desde a ligação alma/patilha até à superfície superior da cabeça.

Durante a medição é visualizada em tempo real a imagem do perfil transversal dos carris medidos, que por sua vez é comparada com o perfil tipo do carril.

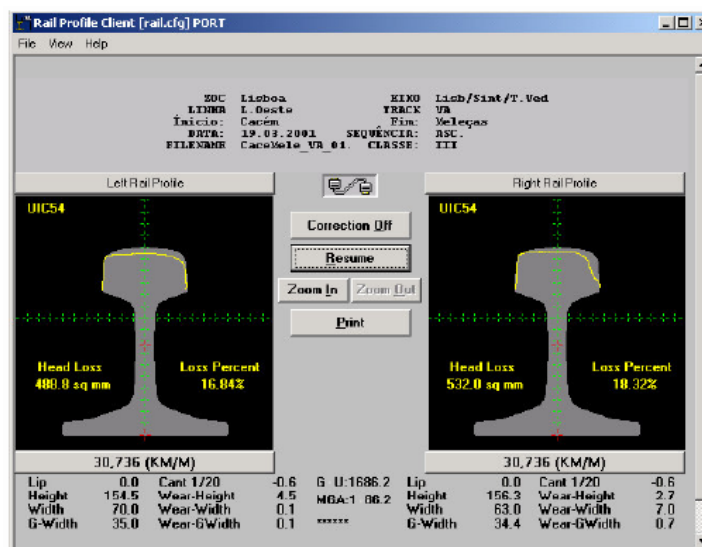


Figura 2.9. Imagens da medição do perfil transversal do carril (REFER, 2008)

No caso da medição do perfil do carril existe também a possibilidade de visualizar num gráfico, como no caso dos parâmetros de geometria da via apresentados anteriormente, os parâmetros da medição do carril e as tolerâncias predefinidas. Esses parâmetros são os seguintes:

- ❖ Desgaste vertical – carril esquerdo;
- ❖ Desgaste lateral – carril esquerdo;
- ❖ Desgaste vertical – carril direito;
- ❖ Desgaste lateral – carril direito.

### 2.3.6 MEDIÇÃO DO PERFIL TRANSVERSAL DA VIA

A inspeção do perfil transversal da via é feita através da medição com um sistema laser, onde se obtêm as seguintes medidas (Fontul, 2013):

- ❖ Largura da entrevia;
- ❖ Gabarito;
- ❖ Medição do perfil do balastro;
- ❖ Medição de distância de obstáculos;

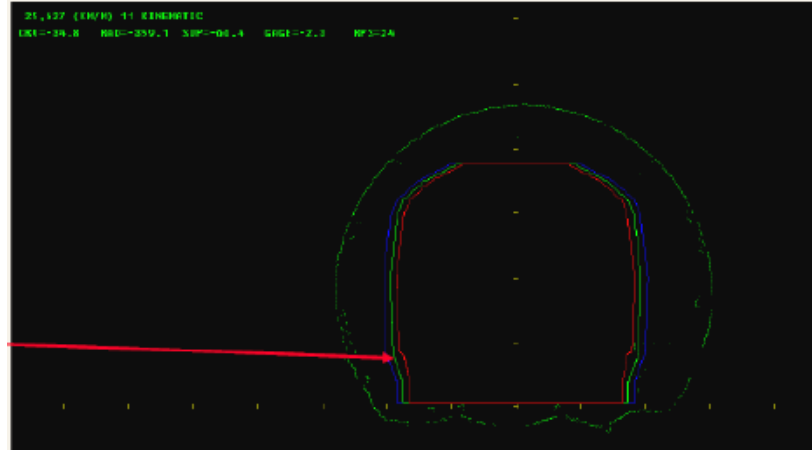


Figura 2.10. Gráfico do perfil transversal da via (REFER, 2008)

### 2.3.7 MEDIÇÃO DAS CAMADAS DA INFRAESTRUTURA COM O RADAR DE PROSPEÇÃO

Para além dos diversos sistemas de inspeção acima apresentados, existe no VIV EM120 também o Radar de prospeção, “*Ground Penetrating Radar*” em Inglês, que tem como função a determinação da espessura das camadas que compõem a subestrutura da via e avaliar o estado de conservação da mesma. Esse sistema será descrito mais em pormenor nos próximos capítulos, sendo o objetivo principal do estudo desenvolvido nesse trabalho.



## 3 RADAR DE PROSPEÇÃO

### 3.1 HISTÓRICO

O Radar de prospeção, “*Ground Penetrating Radar*” (GPR), é um método não destrutivo e rápido para avaliar as condições da subestrutura da ferrovia (Fontul, et al., 2012). Este método tem sido usado para monitorizar os caminhos-de-ferro em vários países na última década, incluindo Portugal. Para além dos caminhos-de-ferro este método é usado em estradas, pontes, aeroportos, entre outros (Su, et al., 2011). O GPR é uma técnica para a deteção de objetos e camadas através da diferença entre as propriedades dielétricas desses materiais (Cruz, et al., 2006).

Os ensaios com o Radar de prospeção para avaliação das infraestruturas de transportes, remontam ao início dos anos 70 quando segundo Morey (1998), a administração federal das autoestradas (FHWA) dos Estados Unidos testou a viabilidade da utilização do radar em túneis e mais tarde em pontes (Saarenketo, 2006). No entanto, a primeira aplicação data de 1929 na Áustria para a determinação da espessura de um glaciário. Os testes que se seguiram, Morey e Kovacs (1978) usaram o radar para detetar a humidade em materiais de construção, Cantor e Kneeter (1978) testaram-no na inspeção dos tabuleiros de pontes e More e Erhard (1978) utilizaram-no para a deteção de vazios em autoestradas de betão (Saarenketo, 2006).

Segundo o trabalho desenvolvido por Saarenketo (Saarenketo, 2006), o primeiro veículo no qual foi montado o sistema GPR para autoestradas, foi desenvolvido através de um contrato com “*Federal Highway Administration*” (FHWA) em 1985 (Morey, 1998). Nos inícios dos anos 80, inspeções com o sistema GPR foram iniciadas no Canadá. Na Escandinávia, nos finais dos anos 70 e inícios dos anos 80, realizou-se o primeiro teste com antenas em contato com a superfície “*ground coupled*”, mas também na Suécia (Ulriksen, 1982, Johansson, 1987 e Carlsten, 1988) e na Dinamarca (Berg, 1984) e mesmo após os resultados terem sido promissores o método não teve grande reconhecimento nessa altura. Saarenketo também refere no seu trabalho (Saarenketo, 2006) que, após os primeiros testes terem sido levados a cabo na Finlândia em 1986 (Saarenketo, 1992) o método rapidamente se tornou uma ferramenta indispensável em vários projetos de reabilitação de estradas na Finlândia (Saarenketo, 1992, Saarenketo e Majjala, 1994 e Saarenketo e Scullion, 1994) e mais tarde no controlo da qualidade de pavimentos (Saarenketo e Roimela, 1998, Scullion e Saarenketo, 1998 e Palli et al., 2005). Existe também a referência no trabalho de Saarenketo (Saarenketo, 2006) que nos finais dos anos 80, houve uma maior aplicação do Radar de prospeção em infraestruturas rodoviárias na América do Norte, desde a medição da espessura dos pavimentos (Maser, 1994), deteção de vazios sob lajes de betão e deteção de zonas deterioradas em tabuleiros de pontes. Nos últimos anos, o GPR tem sido utilizado em diferentes tipos de aplicações, tanto para estradas com baixo volume de tráfego, como para estradas com pavimento flexível ou rígido. Em 2004 Finra publicou as primeiras especificações com as técnicas de uso do GPR em projetos de reabilitação de estradas.

De entre as mais variadíssimas áreas onde este sistema tem sido utilizado, salientam-se para o interesse deste trabalho as aplicações nas infraestruturas ferroviárias. Desde os finais dos anos 90 que o GPR é usado como uma ferramenta para investigar a subestrutura dos caminhos-de-ferro, tendo um desenvolvimento significativo desde então (Vorster, 2012). Tem sido utilizado para a determinação da espessura da camada de balastro que compõe a superestrutura da via, mas também na determinação do seu nível de contaminação, sendo sobre este último que o trabalho do autor incidirá.

### 3.2 FUNCIONAMENTO

O funcionamento do Radar de prospeção baseia-se na emissão de impulsos de energia eletromagnética de curta duração (Sussmann, et al., 2001) (Council, 1994), através da antena emissora, com frequências que podem variar entre 10 MHz e 2,5 GHz, e receção da onda refletida através de uma antena recetora. A onda refletida contém informação relativa ao meio percorrido.

As ondas eletromagnéticas, a serem emitidas para o meio, sofrerão fenómenos, tais como, propagação, transmissão, reflexão, difração e refração do sinal. Estes diversos fenómenos dependem dos materiais que compõem o meio, e das suas propriedades elétricas (condutividade elétrica, permeabilidade magnética e constante dielétrica), bem como da existência ou não de água, entre outros fatores.

A condutividade elétrica de um material é a capacidade de este conduzir ou transmitir corrente elétrica, e é usada para especificar o carácter elétrico de um material. Pode ser dada pela seguinte expressão (infoescola, 2013):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

Onde:

$\sigma$  – condutividade elétrica;

$\rho$  – resistividade;

Os materiais podem assim ser classificados em três grupos, dependendo da sua capacidade de conduzir corrente elétrica, nomeadamente em materiais condutores, materiais semicondutores e isolantes.

Classifica-se os materiais como condutores quando a sua condutividade é superior a  $10^4/\Omega.m$ , semicondutores caso a condutividade esteja entre  $10^{-10}/\Omega.m$  e  $10^4/\Omega.m$  e isolantes caso a condutividade seja inferior a  $10^{-10}/\Omega.m$ .

Quadro 3.1. Lista da condutividade de diferentes materiais (blogspot, 2008)

Material	Substância	Condutividade ( $\Omega \times m^{-1}$ )
Condutores	Prata	$6,8 \times 10^7$
	Cobre	$6,0 \times 10^7$
	Ouro	$4,3 \times 10^7$
	Alumínio	$3,8 \times 10^7$
	Ferro	$1,0 \times 10^7$
	Aço	$0,6 \times 10^7$
	Grafite	$1,7 \times 10^2$
Semi-condutores	Germânio (puro)	2,1
	Silício (puro)	$4,6 \times 10^{-4}$
Isolantes	Vidro	$1,0 \times 10^{-11}$
	Borracha	$1,1 \times 10^{-15}$

De toda a gama de materiais, existem materiais que, conseguem absorver os sinais emitidos pelas antenas, assim sendo consequentemente, será mais difícil conseguir a propagação das ondas nesses meios, reduzindo assim a profundidade de penetração. A água é um desses materiais que promove uma grande absorção da onda, e como resultado, a sua presença nos materiais a ensaiar afeta significativamente a constante dielétrica dos mesmos. Existem também materiais que podem ser considerados como refletores ideais, entre os quais encontram-se os metais (ouro, prata, cobre e alumínio). Por outro lado, existem materiais com uma fraca condutividade (solos arenosos, rochas), que devido a essa característica permitem atingir maiores profundidades de penetração da onda do Radar de prospecção (Pedrosa, 2009) (Fortunato, 2005), considerados como meios transparentes.

A permeabilidade magnética quantifica o magnetismo de uma substância, sendo esta uma grandeza que exprime a diferença magnética existente entre diferentes materiais e que pode ser expressa da seguinte forma (brasilescola, 2013):

$$k_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \quad (5)$$

Onde:

$k_m$  – permeabilidade magnética;

$\mu_0$  – permeabilidade magnética do vácuo;

Relativamente à sua permeabilidade magnética, os materiais podem ser divididos em três grupos:

- ❖ Materiais ferromagnéticos – os valores neste caso são muito superiores a 1, como, por exemplo o ferro;
- ❖ Materiais paramagnéticos – neste grupo existem valores ligeiramente superiores a 1, como é o caso do ar e do alumínio;
- ❖ Materiais diamagnéticos – onde existem valores inferiores a 1, aparecendo nesta categoria a água e o cobre;

A propriedade eletromagnética dos materiais que terá um maior impacto nesse estudo, será a constante dielétrica, designada também como permitividade relativa. Define-se esta grandeza adimensional como uma relação entre a constante dielétrica de um material ( $\epsilon$ ) e pela constante dielétrica do vácuo, ( $\epsilon_0$ ), sendo dada pela seguinte expressão (efísica, 2013) (Ulriksen, 1982):

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (6)$$

Onde:

$\epsilon$  – constante dielétrica de um material;

$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{F/m}$  (constante dielétrica do vácuo);

K – constante dielétrica relativa;

A constante dielétrica relativa de um material tem em conta a velocidade de propagação da onda no meio e a velocidade da luz no vácuo, sendo essa última igual à velocidade da luz. Nos meios transparentes, referidos anteriormente, ao existir uma baixa condutividade, a constante dielétrica será igualmente baixa, próxima da unidade. Neste caso, a velocidade de propagação da onda no meio, será próxima à da velocidade de propagação desta no vácuo.

A constante dielétrica relativa (K) de um material é dada pela seguinte expressão:

$$K = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (7)$$

Onde:

c – velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ );

v – velocidade de propagação no meio;

K – constante dielétrica relativa;

Os impulsos eletromagnéticos enviados para o subsolo através de uma antena transmissora, sempre que encontram interfaces entre materiais com propriedades elétricas bem contrastantes, estas poderão



sofrer diversos fenômenos, mencionados anteriormente. Entre estes fenômenos tem-se, a reflexão, difração e a refração. A onda que é refletida será captada pela antena receptora.

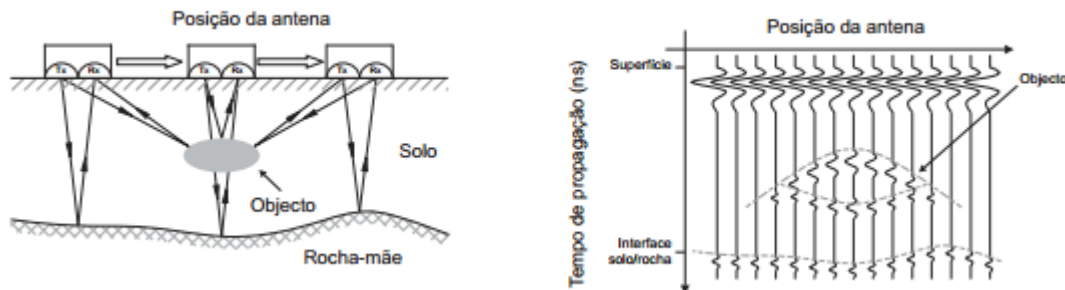


Figura 3.1. Princípio de funcionamento do georadar (Fernandes & Lourenço, 2007)

A outra parte da onda atravessará a interface continuando a sua propagação no meio até encontrar uma nova camada voltando a repetir o processo. A velocidade de propagação dessa energia eletromagnética e a sua reflexão nas interfaces entre diferentes materiais estão relacionadas com as propriedades elétricas e magnéticas dos diferentes materiais, assim sendo, o impulso enviado ao meio propagar-se-á a uma velocidade igual à permitida pelo campo eletromagnético do material que constitui o mesmo (eeg-geophysics, 2013).

A profundidade da secção explorada depende fundamentalmente da frequência do impulso que é emitido ao terreno e da duração do tempo que leva à receção das reflexões dos sinais que foram emitidos às camadas no subsolo. Pode-se assim dizer que um tempo de receção maior permite investigar a profundidades mais elevadas, no entanto a natureza do terreno, características elétricas dos materiais, também irá influenciar a profundidade de penetração (eeg-geophysics, 2013). A propagação da onda eletromagnética no meio vai depender da condutibilidade do material no meio por onde viaja, como foi dito anteriormente. Assim sendo, em materiais condutores ocorre uma maior absorção da onda havendo uma menor penetração no meio por parte desta.

Logo, a água sendo um material muito condutor a onda vai demorar a percorrer esse meio fazendo com que a água (elevada condutibilidade) tenha uma constante dielétrica elevada e no caso do ar (fraca condutibilidade) seja o oposto.

Pode-se observar na tabela seguinte as constantes dielétricas de diferentes materiais e como estas variam com a variação da velocidade de propagação da onda no meio em causa (Peter & Ulriksen, 1982):

Quadro 3.2. Constante dielétrica de diferentes materiais (Lourenço, 2012) (Ulriksen, 1982)

Material	Constante dielétrica - K	Velocidade (mm/ns)
Ar	1	300
Água de nascente	81	33
Água do mar	81	33
Neve Polar	1,4 – 3	194 – 252
Gelo Polar	3 – 3,15	168
Gelo Temperado (Temperate ice)	3,2	167
Gelo Puro	3,2	167
Lago gelado	4	150
Mar gelado (Sea ice)	2,5 – 8	78 – 157
“Permafrosi” (solo abaixo dos 0º)	1 – 8	106 – 300
Areia seca da costa	10	95
Areia (seca)	3 – 6	120 – 170
Areia (molhada)	25 – 30	55 – 60
Sedimentos (molhados)	10	95
Argila (molhada)	8 – 15	86 – 110
Solo argiloso seco	3	173
Pântano	12	86
Terra Agrícola	15	77
Terra Pastoral	13	83
Solo ameno	16	75
Granito	5 – 8	106 – 120
Pedra Calcária	7 - 9	106 – 113
Dolomite	6,8 – 8	106 – 115
Basalto (molhado)	8	106
Xisto (molhado)	7	113
Arenito (molhado)	6	112
Carvão	4 – 5	134 – 150
Quartzo	4,3	145
Cimento	6 – 30	55 – 112
Asfalto	3 – 5	134 – 173
PVC. Poliésteres, Epoxy	3	173

Esta tecnologia embora tenha diversas vantagens, desde a rapidez na aquisição dos dados e a rapidez com que se pode avaliar a natureza e a estrutura do subsolo, existem no entanto algumas dificuldades relativas à interpretação dos resultados, bem como, a necessidade de pessoal experiente para realização e interpretação de ensaios.

### 3.3 EQUIPAMENTOS

O sistema do Radar de prospeção é constituído por cinco elementos, são eles: 1) unidade de controlo; 2) antenas; 3) unidade de visualização; 4) unidade de armazenamento de dados; 5) acessórios. Na Figura 3.2 apresentam-se os três sistemas de Radar de prospeção utilizados no âmbito deste estudo, nomeadamente as unidades de controlo, visualização e armazenamento de dados.



Figura 3.2. Sistemas do georadar que foram utilizados; a) sistema GSSI (500 e 900 MHz); b) sistema IDS; c) Sistema GSSI (1 e 1,8 GHz)

A unidade de controlo gera o sinal através de um transmissor e capta o sinal através de um recetor, medindo o tempo e amplitude dos sinais recebidos. As antenas emitem a radiação eletromagnética registando as reflexões ocorridas no meio, transformando estas reflexões em informação digital, que é armazenada e posteriormente será processada. Uma das antenas emite o sinal, e outra recebe esse mesmo sinal, após o seu percurso no meio a ensaiar (Olhoeft & Selig, 2002).

No caso das operações de transmissão e receção do sinal feitas apenas por uma antena, diz-se que é um processo monoestático. Caso haja duas antenas para efetuar as operações de transmissão e receção do sinal, diz-se que biestático, sendo este último modelo apresentado na figura seguinte (Fernandes & Lourenço, 2007).

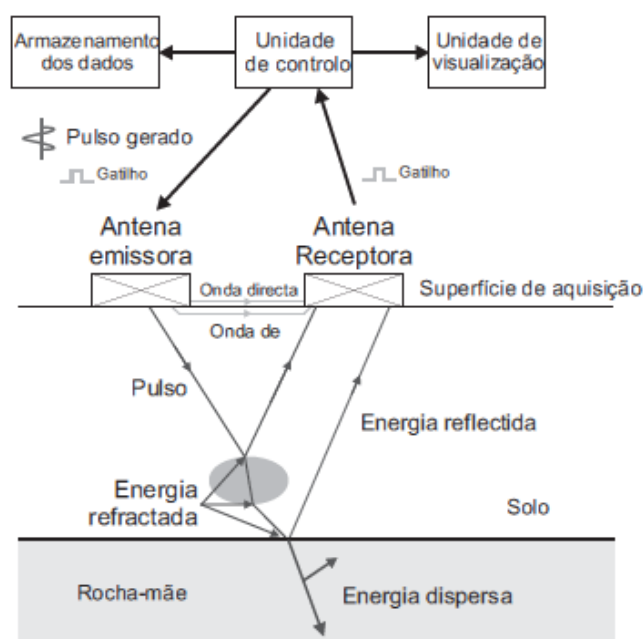


Figura 3.3. Modelo biestático do funcionamento do sistema do georadar (Fernandes & Lourenço, 2007)

As antenas, por ser a parte do equipamento que transmite e recebe os impulsos, representam um elemento fundamental deste sistema. As antenas podem ter várias frequências que vão desde os 10 MHz até vários GHz.

A escolha das antenas para as diversas utilizações, deve ter em conta a relação entre a resolução que se quer e a profundidade de penetração a que precisamos chegar. A segunda consideração que se deve ter em conta na escolha das antenas diz respeito à posição da antena, podendo ser antenas em contato com a superfície (*ground coupled antennas*) e antenas suspensas (*air coupled antennas*).

As antenas suspensas são usadas para investigar as camadas mais superficiais, sendo um sistema que se encontra a 30 - 50 cm da superfície. Estando a uma altura considerável, livre de obstáculos, uma das vantagens é que conseguimos com estas antenas fazer os ensaios a maiores velocidades.

Este tipo de antenas opera normalmente com frequências entre 500 MHz e 2,5 GHz, sendo a frequência mais usualmente utilizada a de 1 GHz, o que acaba por limitar a profundidade de penetração para 50 a 90 cm. Devido às elevadas frequências, conseguimos ter um sinal com melhor resolução (Fontul, 2004).

As antenas que funcionam em contato com a superfície, podendo se encontrar ligeiramente acima desta, operam normalmente com frequências entre 80 MHz e 1500 MHz. Normalmente, devido a se encontrarem em contato com a superfície, a velocidade de ensaio só pode ir até 30 km/h.

As vantagens deste tipo de antenas estão no fato de conseguirmos atingir maiores profundidades de penetração, podendo ir até aos 30 m, no entanto, não se consegue tirar qualquer informação da zona

superficial. Uma outra vantagem deste tipo de antenas consiste no fato de conseguirmos apanhar mais informação vertical (Saarenketo, 2006).

### 3.4 APLICAÇÕES DO RADAR DE PROSPECÇÃO

O Radar de prospecção (GPR) tem uma vasta gama de aplicações, em diversos campos. Este pode ser usado em geociências, para o estudo de solos, de gelo, entre outros. Pode ser utilizado em aplicações de engenharia como ensaio não destrutivo em pavimentos e equipamentos subterrâneos. É ainda usado para arqueologia, e para uso militar, na detecção de minas, por exemplo. Outras utilizações são possíveis com este equipamento e todas estas aplicações podem ser classificadas em duas categorias que se focam sobretudo nas frequências usadas pelas antenas (Hanninen, et al., 1992).

- Para aplicações geológicas, utiliza-se antenas de menor frequência, como 500 MHz ou inferior, porque não é precisa uma grande resolução, mas uma grande capacidade de penetração, de maneira a atingir grandes profundidades no terreno.
- Para aplicações mais viradas para a engenharia, ou até mesmo em alguns casos geológicas, em que haja interesse nas camadas superficiais do terreno e onde seja necessário possuir uma grande resolução, utilizam-se antenas de maior frequência com valores superiores a 900 MHz.

Na Tabela seguinte podem-se observar melhor as categorias onde se encontram colocadas as diversas aplicações do Radar de prospecção.

Quadro 3.3. Relação entre a frequência de uma antena e a sua profundidade de penetração (Fernandes & Lourenço, 2007)

Frequência	Penetração	Resolução	Aplicações correntes
10 a 50 MHz	10 a 50 m	Baixa	Geologia, geotecnia mineira e ambiente
100 MHz	5 a 20 m		Geotecnia, ambiente e engenharia
200 MHz	2 a 7 m	Baixa a média	
500 MHz	1 a 4 m	Média a alta	Engenharia
1000 MHz	0.5 a 1.5 m	Alta	
>1500 MHz	0.4 a 0.5 m	Muito Alta	

Apresenta-se de seguida as diferentes áreas de aplicação do Radar de prospecção, tendo em conta a frequência das antenas utilizada (Yelf, 2007):

- ❖ Alta frequência – atinge menores profundidades mas com uma resolução superior (Lourenço, 2012) (Fernandes & Lourenço, 2007):
  - Detecção de armaduras e de bainhas de pré-esforço (engenharia civil) – com esta aplicação consegue-se determinar a localização de elementos metálicos, armaduras, sem este conhecimento pode-se ter problemas em relação à estabilidade.

- Geometria de elementos de alvenaria (engenharia civil) – através deste método consegue-se detetar a espessura dos diferentes elementos de alvenaria.
- Cabos elétricos (engenharia civil) – consegue-se mapear infraestruturas enterradas, como cabos elétricos.
- Humidade (engenharia civil) – o Radar de prospeção tem a capacidade de avaliar estruturas relativamente à presença ou não de água.
- Ciências Forenses – nesta área o sistema GPR pode ser usado para pesquisar e localizar os objetos procurados pelos investigadores forenses, tais como, cadáveres.

Outros exemplos:

- Avaliação de infraestruturas de transportes.

❖ Baixa frequência – atinge maiores profundidades acabando por ter uma menor resolução (Lourenço, 2012) (Pedrosa, 2009):

- Determinação da espessura do gelo – o Radar de prospeção é um método preciso na determinação da espessura do gelo, no entanto caso haja água no interior do gelo, a interpretação dos resultados pode ser dificultada.
- Topografia – este método tem sido usado em levantamentos topográficos, para fazer o levantamento de uma região, através da acoplagem do Radar de prospeção à fuselagem de um helicóptero. Como o ar é um meio favorável para a propagação de ondas eletromagnéticas, torna-se eficaz este método.
- Detecção de cavidade de massas rochosas – tem a capacidade de investigar estruturas de solos e sedimentos, conseguindo fazer a distinção entre áreas homogêneas e não homogêneas.

Outros exemplos:

- Mapeamento de lagos e leitos de rio.
- Detecção de falhas, juntas e fissuras na rocha consolidada.
- Determinação da profundidade da água.
- Mapeamento do aquífero base.

### 3.5 APLICAÇÕES NA AVALIAÇÃO DE INFRAESTRUTURAS FERROVIÁRIAS

Tendo em conta toda a gama de aplicações do Radar de prospeção, nas mais variadíssimas áreas, esta tem sido uma técnica utilizada também em infraestruturas ferroviárias, com alguma importância. Em Portugal este método encontra-se ainda em fase de crescimento, no entanto, tem sido utilizado em diversos países da Europa, com maior incidência nos países nórdicos.

Tendo em conta as diversas aplicações do GPR em infraestruturas ferroviárias, estas podem ser divididas em dois grupos, consoante a frequência das antenas utilizadas.

Caso se pretenda utilizar o radar na determinação da espessura das camadas, são utilizadas antenas de menor frequência (500 MHz ou inferior), caso se precise avaliar o estado de contaminação do balastro e a evolução da sua degradação, através do cálculo da constante dielétrica, existe a necessidade de recorrer a antenas de maior frequência (superior a 500 MHz, geralmente 2 GHz).

Diversos estudos já foram feitos de maneira a dar a conhecer a importância da utilização do Radar de prospeção em ferrovias. Um desses estudos serviu para expor os benefícios e limitações do Radar de prospeção na avaliação das mesmas, tendo estudado a determinação da espessura do balastro e localização das zonas onde este se encontrava contaminado (Hugenschmidt, 2000).

Outro estudo serviu para mostrar que existe a possibilidade de identificar a estrutura geológica onde assentará a via, havendo a medição das espessuras das camadas identificando possíveis causas de defeitos (The Finnish Geotechnical Society, 1992). Foi também exposto por outros autores a possível utilização do Radar de prospeção para avaliação dos elementos da infraestrutura da via, tanto o balastro, como o sub-balastro e a camada de coroamento recorrendo a três pares de antenas suspensas de 1 GHz (Hyslip, et al., 2003) e antenas suspensas de 2 GHz (Roberts, et al., 2006). Foi também estudada a possibilidade de utilizar o GPR em trabalhos de manutenção de infraestruturas ferroviárias (Jack & Jackson, 1999).

Estudos mais recentes mostram a possibilidade de utilizar o GPR na manutenção de infraestruturas ferroviárias de alta velocidade, detetando e avaliando o estado da subestrutura dessas vias e ao mesmo tempo eliminar potenciais riscos para a segurança (Liu & Zhang, 2012). Outro desses estudos permitiu a classificação automática dos registos feitos pelo Radar de prospeção para avaliação do balastro da ferrovia, através da interpretação do sinal (Shao, et al., 2011).





## 4 AVALIAÇÃO DAS CONSTANTES DIELÉTRICAS EM LABORATÓRIO

### 4.1 INTRODUÇÃO

O Radar de prospeção referido anteriormente é um método não destrutivo e rápido para inspeção e monitorização das infraestruturas ferroviárias. No entanto, para além das vantagens perceptíveis deste método, existe o problema da interpretação dos resultados, processo que necessita de pessoal qualificado para esse efeito.

Uma melhor interpretação dos resultados está relacionada com a experiência do intérprete no terreno, pois apenas com a teoria torna-se difícil perceber os resultados.

Para além da experiência do profissional, é necessário saber o que se tem exatamente na subestrutura, havendo a necessidade de abrir poços para ter uma estimativa das espessuras das diferentes camadas existentes na ferrovia.

Para que se possa avaliar o estado da via, existe sempre a necessidade de saber a espessura das camadas como foi dito anteriormente ou então saber exatamente o tipo de material que se tem naquele local.

Neste capítulo são apresentados três estudos realizados em laboratório com 5 antenas de diferentes frequências.

O primeiro estudo foi feito em balastro limpo, tendo como propósito: 1) determinar a constante dielétrica de um balastro sabendo a sua espessura; 2) determinar a constante do mesmo balastro quando sujeito à interferência da água.

O segundo estudo executado em laboratório, teve como objetivo: 1) determinar a constante dielétrica de um solo com diferentes teores em água, sabendo também neste caso a sua espessura.

O último estudo feito, teve como propósito: 1) determinar a constante dielétrica de um balastro contaminado, com diferentes teores em água. Nesse caso, foram estudados vários níveis de contaminação do balastro.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para os diferentes estudos feitos em laboratório, os quais são referidos mais à frente, foram utilizados vários materiais com características diferentes. De maneira a caracterizar esses materiais, foram realizados vários ensaios, geralmente utilizados para a caracterização deste tipo de materiais em laboratório. Foram assim caracterizados, não só o balastro limpo e o solo, mas também o balastro contaminado, o qual será apresentado mais à frente.

Inicialmente foram caracterizados o balastro limpo e o solo argiloso, posteriormente utilizado para contaminação do balastro.

Tanto para o balastro limpo como para o solo foi feita a sua granulometria, no entanto, no caso do balastro, sendo este um agregado para via-férrea a norma seguida foi a NP EN 13450 de 2003 enquanto para o solo seguiu-se a especificação do LNEC E 196-1967. Apresenta-se de seguida a respetiva curva granulométrica, para cada um dos materiais.

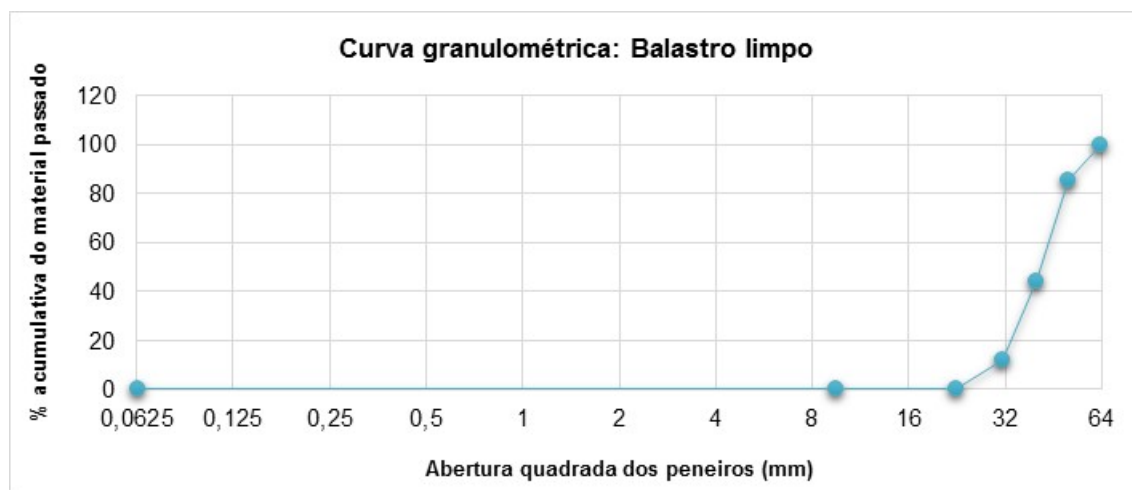


Figura 4.1. Curva granulométrica do balastro limpo utilizado nos ensaios

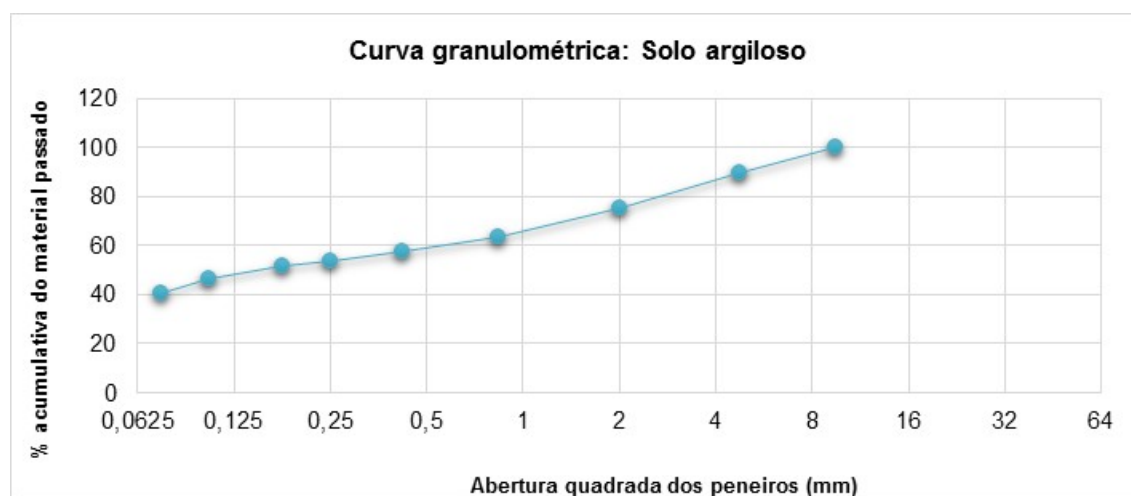


Figura 4.2. Curva granulométrica do solo utilizado nos ensaios

Existem especificações, ao nível europeu e nacional, para controlo da granulometria do balastro, de maneira a garantir a adequação das suas dimensões. Na Figura 4.3 é apresentada a curva granulométrica do balastro, já referenciada anteriormente, em conjunto com os fusos de controlo especificados pela REFER (Fontul & Fortunato, 2010) (IT.GEO.001, 2008).

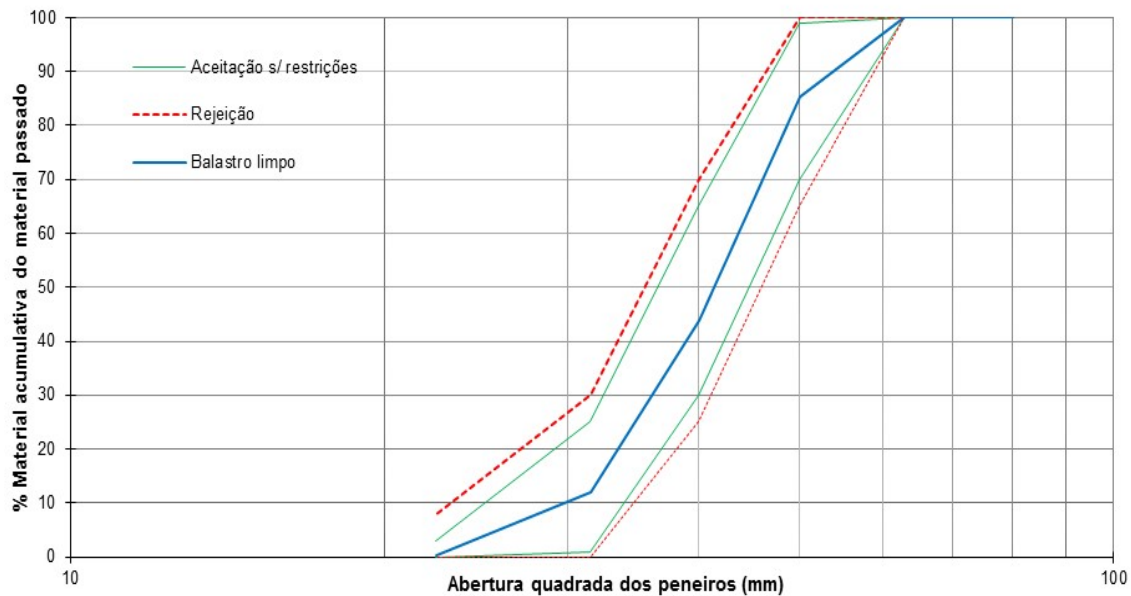


Figura 4.3. Gráfico com o fuso de controlo do balastro e curva granulométrica obtida (Fontul & Fortunato, 2010)

Para além da granulometria que foi feita tanto para o solo como para o balastro, foi determinada a massa volúmica de ambos os materiais, bem como a absorção de água no caso do balastro limpo e o teor em água para o caso do solo. A absorção de água e a massa volúmica do balastro foram realizadas segundo a norma NP EN 1097-6 2003, tendo como resultado os seguintes valores:

*Massa volúmica das partículas secas* =  $2,62 \text{ Mg/m}^3$

*Absorção de água* = 0,35%

No caso do solo, para além da granulometria, foi também determinada a massa volúmica segundo a norma NP 581-1969 e o teor em água ótimo segundo a especificação E 197-1966. Estes resultados foram de seguida utilizados para o estudo do solo e para o estudo do balastro contaminado.

*Densidade das partículas* =  $2,71 \text{ Mg/m}^3$

*Teor em água ótimo* = 8,4%

## 4.3 PREPARAÇÃO DOS MODELOS FÍSICOS

### 4.3.1 SÍNTESE DOS ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios realizados, tendo em conta as condições dos diferentes materiais, são apresentados resumidamente no Quadro 4.1.:

Quadro 4.1. Tabela com o resumo dos ensaios feitos

Casos de estudo		Índice de Contaminação	Teor em água (%)
<b>1 Balastro limpo</b>		-	7 níveis (seco, molhado, saturado e deixou-se secar o balastro)
<b>2 Solo</b>		-	6%, 8%, 10% e 12%
<b>3 Balastro contaminado</b>	<b>3.1</b>	1	8,4%
	<b>3.2</b>	6	6%, 8%, 10% e 12%
	<b>3.3</b>	15	6%, 8%, 10% e 12%
	<b>3.4</b>	35	6%, 8%, 10% e 12%
	<b>3.5</b>	55	6%, 8%, 10% e 12%

Os casos de estudo serão tratados em mais pormenor nos subcapítulos que se seguem.

### 4.3.2 ESTUDO DO BALASTRO LIMPO - CASO DE ESTUDO 1

O balastro analisado no caso de estudo 1, foi caracterizado antes de ser utilizado através de ensaios em laboratório tendo sido determinada a sua granulometria, a sua massa volúmica e a absorção de água, como foi mencionado anteriormente. O balastro foi fornecido pela REFER, sendo proveniente de uma pedreira autorizada pela mesma entidade para fornecer balastro ferroviário

Depois dos testes feitos ao balastro, este foi levado há estufa para secagem. A quantidade de balastro utilizado nesta fase foi de cerca de 670 kg, que foi colocado a uma temperatura de  $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Como recipiente de ensaio foi utilizada metade de um reservatório em plástico com uma área de um metro quadrado e uma altura de 50 cm. Para compactar o balastro, sendo o reservatório em plástico foi necessário confiná-lo através de um material com maior resistência, como se pode observar na figura seguinte:



Figura 4.4. Material de confinamento do reservatório aquando da compactação

O balastro foi compactado em camadas de 10 cm e com uma duração de cerca de 15 minuto no reservatório, cuja área é de cerca de  $1 \text{ m}^2$ , ficando no final o balastro com uma altura total de 38,8 cm. Antes da colocação do balastro foi necessário revestir o fundo do reservatório com folha de alumínio para realização das medições das constantes dielétricas dos materiais ensaiados. Este procedimento foi adotado para todos os casos de estudo, como a folha de alumínio é um refletor ideal, e sabendo a espessura das camadas do material colocado nos recipientes de ensaio, conseguiu-se saber a constante dielétrica nos diferentes testes com base na velocidade de propagação da onda do Radar de prospeção.

Depois de terem sido feitos ensaios com as antenas no balastro seco, foram feitos também ensaios no balastro molhado (simulação de uma chuvada) e no balastro saturado, imerso em água. O seguimento do ensaio, em termos de alturas de água utilizadas apresenta-se na Figura 4.6. Assim, depois de saturado, foi retirado um terço da altura de água, processo repetido até retirar-se toda a água. Em cada uma das diferentes fases de imersão em água, foram realizados ensaios com todas as antenas disponíveis. Por último foi deixado secar o balastro fazendo ensaios todos os dias, até obter uma constante dielétrica semelhante à do balastro seco e constante ao longo do tempo.



Figura 4.5. Modelo com a folha de alumínio para o caso de estudo 1

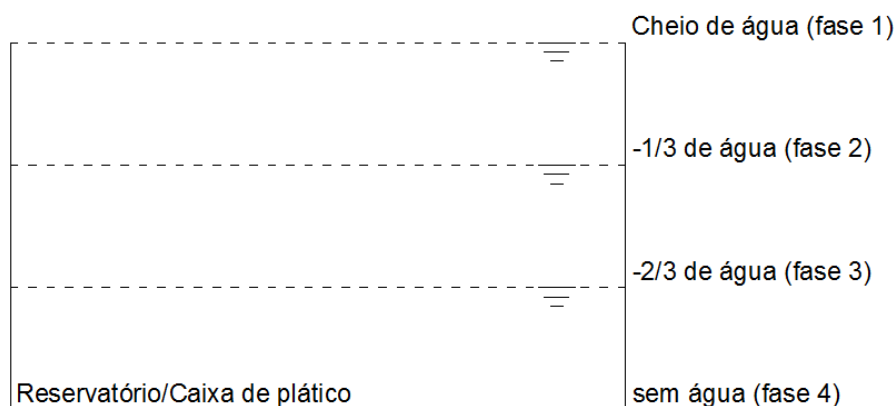


Figura 4.6. Fases adotadas para realização do ensaio com as antenas

#### 4.3.3 ESTUDO DO SOLO - CASO DE ESTUDO 2

Antes da utilização do solo para o caso de estudo, foi feita a sua granulometria e determinada a sua massa volúmica, como referido anteriormente.

Foram feitos ensaios no solo com teores em água de 6%, 8%, 10% e 12%, sabendo que o teor em água ótimo é de 8,4%. Para este caso de estudo foi utilizada uma caixa de plástico com cerca de 0,25m<sup>2</sup>, na qual se colocaram películas de alumínio com o mesmo propósito que para o caso de estudo 1.



Figura 4.7. Modelo da caixa utilizada para o caso de estudo 2

A compactação do solo foi realizada em 5 camadas de 6 cm cada, com um compactador mais potente do que o utilizado no primeiro caso de estudo e com uma duração de compactação de 6 minutos em cada camada. Foi feita uma previsão do solo necessário para cada camada, admitindo uma massa volúmica que este iria ocupar depois de compactado. Depois de compactado, o solo ficou com uma altura de 30,1, 29,3, 30,3 e 27,9, para os teores de água de 6%, 8%, 10% e 12%, respetivamente.

A água, utilizada para os vários casos de teor em água estudados, foi adicionada ao solo, antes de colocação na caixa de ensaio, num tabuleiro à parte e não diretamente na caixa, tentando sempre que o solo ficasse homogeneizado através da mistura, não ficando molhado por fora e completamente seco por dentro.

No topo da última camada foram realizados ensaios com as antenas, bem como, a verificação do teor em água com o equipamento Gamadensímetro (TROXLER), depois de cada conjunto de ensaio realizado com as antenas, para ter uma validação do teor em água efetivo da caixa durante o ensaio.



No fim do ciclo de ensaios em cada caso de estudo, antes de desmontar a caixa de material foi também realizado um ensaio da garrafa de areia para controlo do teor em água.

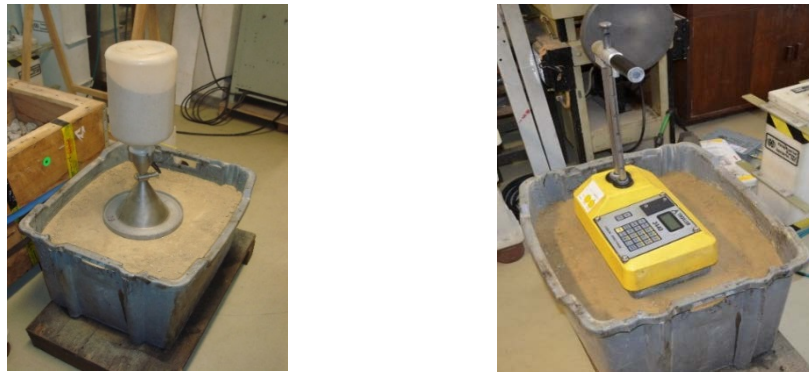


Figura 4.8. Equipamentos para determinação do teor em água; a) ensaio da garrafa; b) Gamadensímetro (TROXLER)

#### 4.3.4 ESTUDO DO BALASTRO CONTAMINADO - CASO DE ESTUDO 3

Para o último caso que foi estudado em laboratório, teve-se em conta o índice relativo da contaminação do balastro (índice de Indraratna) que se falou anteriormente. Este índice é dado pela seguinte fórmula:

$$R_{b-f} = \frac{M_f}{M_b} \cdot \frac{G_{s-b}}{G_{s-f}} \quad (8)$$

Onde:

$M_f$  – massa do solo usado, como material de contaminação (massa dos finos);

$M_b$  – massa do balastro;

$G_{s-b}$  – massa volúmica do balastro (2,62 Mg/m<sup>3</sup>)

$G_{s-f}$  – massa volúmica dos finos (2,71 Mg/m<sup>3</sup>)

Tendo em conta a fórmula anterior e com base no Quadro 2.1, foram escolhidos cinco níveis de contaminação, pertencentes a diferentes intervalos propostos por Indraratna.

Quadro 4.2. Categorias de contaminação do balastro baseadas nos diferentes índices (Indraratna, et al., 2011)

Categorias	Intervalos propostos por Indraratna	Índices de contaminação adotados
Balastro limpo	$x < 2$	1
Balastro moderadamente limpo	$2 \leq x < 10$	6
Balastro moderadamente contaminado	$10 \leq x < 20$	15
Balastro contaminado	$20 \leq x < 50$	35
Balastro muito contaminado	$x \geq 50$	55

Desses intervalos de contaminação definidos por Indraratna, teve-se em atenção para selecionar um índice de cada uma das categorias de contaminação, normalmente correspondente ao meio do intervalo. Para prosseguir com os ensaios em laboratório, teve-se de ter em conta a quantidade de material (balastro limpo e solo) necessária, de maneira a obter nos modelos físicos o índice de contaminação pretendido. O Quadro 4.3. apresenta a quantidade de solo e de balastro limpo a utilizar para cada um dos índices de contaminação adotados.

Quadro 4.3. Índices de contaminação admitidos

	1	6	15	35	55
<b>Balastro limpo (kg)</b>	180	180	180	180	184,73
<b>Solo (kg)</b>	1,90	11,20	27,90	65,20	109,64

Para cada índice de contaminação estudado foram simulados quatro níveis de teor em água (6%, 8%, 10% e 12%), com exceção do primeiro índice para qual foi apenas utilizado o teor em água ótimo. Os teores em água são referentes ao solo, utilizado como material de contaminação.

No caso do primeiro índice de contaminação estudado, correspondente a uma contaminação muito baixa, a quantidade de água a acrescentar para a simulação dos vários teores em água, sendo relativa ao solo, era bastante reduzida. Assim, era expectável que não houvesse alteração na constante dielétrica para os vários teores em água, consequentemente foi simulado só o caso do teor em água ótimo.

Nos restantes índices de contaminação, como já referido, foram simulados quatro teores em água diferentes. A construção do modelo físico de cada contaminação foi feita com o teor em água mais baixo, de 6%, sendo o solo misturado com a água, num tabuleiro separado e depois juntado ao balastro. Os teores em água superiores foram obtidos acrescentado água ao modelo físico.

Além dos quatro teores em água referidos, foi também simulada a saturação dos modelos físicos no fim, exceto no caso do índice 35, dado a razões logísticas e limitação do tempo de ensaio.

O modelo físico do índice 55 foi saturado e deixado a secar até chegar a um valor de constante dielétrica constante. Nesse modelo físico foram realizadas medições com o Radar de prospeção ao longo deste período.

Foi utilizado para os modelos físicos dos diferentes níveis de contaminação uma caixa de madeira com uma área de cerca de 0,40 m<sup>2</sup>, no fundo da qual se colocaram folhas de alumínio na semelhança dos ensaios anteriores, com o objetivo de simular um refletor ideal.



Para a compactação do balastro contaminado foi utilizado um compactador menos potente do que no caso de estudo do solo, pois houve apenas a necessidade de vibrá-lo de modo a não ocorrer a desagregação do balastro, aumentando assim a quantidade de finos (material de contaminação) e alterando o índice de contaminação.

A compactação dos modelos físicos foi feita em 4 camadas de 7,5cm cada, resultando numa amostra de cerca de 30cm, no entanto, esta altura nos últimos índices aumentou, devido ao aumento de volume por parte do solo, ficando o índice 55 com 35,7 cm. A compactação no caso dos índices 1, 6, 15 e 35 foi feita com o compactador menos potente e durou cerca de 10 minutos por cada camada.

No caso do índice 55 foi utilizado o compactador mais potente, devido à quantidade de solo colocado. A compactação de cada camada teve a duração de cerca de 12 minutos, os primeiros 10 minutos semelhantes aos casos anteriores e mais 2 minutos com o compactador mais potente.

Parte do balastro utilizado para as medições realizadas no caso de estudo do balastro limpo foi aproveitada para a construção dos modelos físicos para os vários índices de contaminação, geralmente mantendo a mesma quantidade de balastro e adicionando apenas o solo.

No final de cada ensaio em modelo físico, foi determinada a granulometria de cada índice de contaminação, pelo que se apresenta a seguir a curva granulométrica correspondente a cada índice. No mesmo gráfico está apresentado um fuso granulométrico correspondente a centenas amostras de balastro recolhidas na Linha do Norte na altura da sua modernização, no âmbito de uma investigação realizada pelo Fortunato (Fortunato, 2005), para comparar o enquadramento das curvas estudadas nesse fuso.

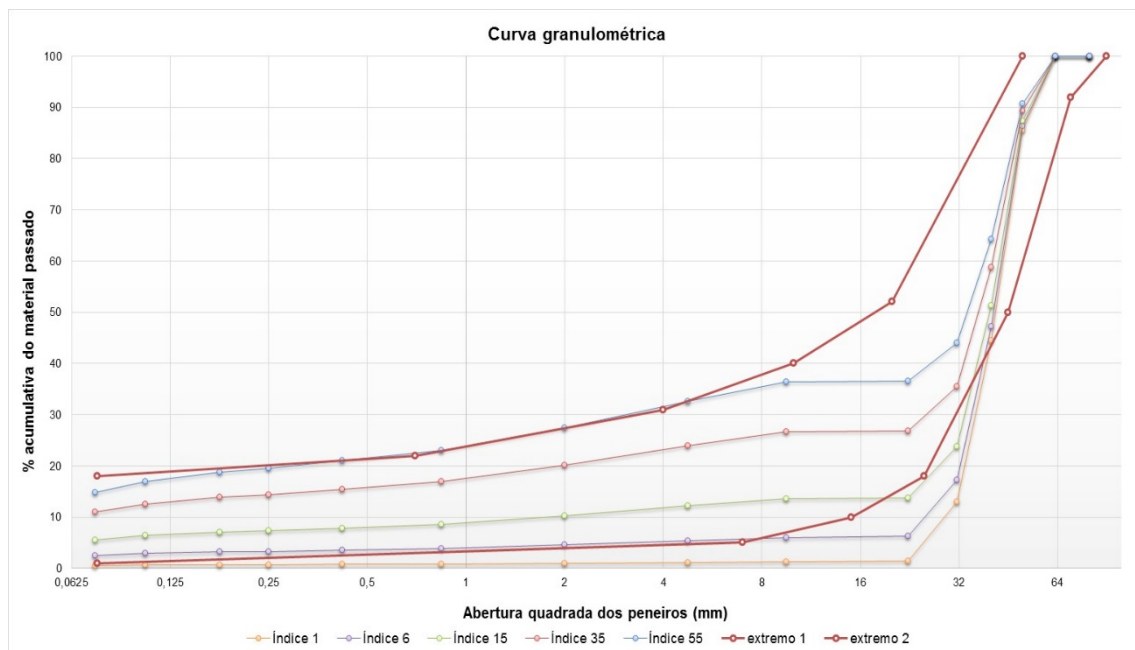


Figura 4.9. Curvas granulométricas relativas a cada índice de contaminação, com o fuso granulométrico para balastro contaminado (Fortunato, 2005)

Como se consegue observar na Figura 4.9, verifica-se que o índice 1 e o 6 se encontram fora dos extremos, devido a estes serem considerados balastro limpo e moderadamente limpo, respetivamente.

## 4.4 EQUIPAMENTO UTILIZADO

Para os diferentes casos de estudo foram utilizados três tipos de sistemas de Radar de prospeção com as antenas próprias que serão apresentadas de seguida. Dois dos sistemas são da *Geophysical Survey System* (GSSI) tendo associados quatro conjuntos de antenas, de 500 MHz, 900 MHz, 1000MHz e 1800 MHz, e o terceiro é da *Ingegneria Dei Sistemi* (IDS), tendo uma antena de 400 MHz. Este último será o objeto principal deste estudo sendo o equipamento normalmente utilizado para ensaios em infraestruturas ferroviárias, propriedade da REFER.

Na aquisição do sinal são normalmente aplicados filtros que têm como objetivo principal limpar o sinal, permitindo a emissão de ondas apenas num determinado intervalo de frequências. Nos ensaios realizados “*in situ*” em infraestruturas ferroviárias, apresentados no capítulo seguinte, os filtros aplicados ao equipamento da IDS, ajudam a reduzir a interferência provocada pelos carris metálicos.

Os sistemas de Radar de prospeção utilizados são apresentados de seguida.

### 4.4.1 SIR 20 (GSSI) E ANTENAS SUSPENSAS

O sistema de aquisição SIR 20 da GSSI (GSSI, 2006) é constituído por uma unidade de controlo e por dois conjuntos de antenas suspensas (antena emissora e antena recetora), de 1,0 GHz e de 1,8 GHz de frequência. Nos ensaios as antenas foram colocadas num sistema artesanal, diferente para cada um dos casos que se estudou, de forma a garantir a distância a superfície dos modelos físico requerida por este tipo de antenas (entre 40 e 50 cm), como se pode observar na Figura 4.10:



Figura 4.10. Sistemas utilizados para apoio das antenas de 1,0 GHz e de 1,8 GHz para cada caso de estudo; a) Balastro limpo; b) Balastro contaminado; c) Solo

Para uma melhor medição e visualização dos dados recebidos, foi necessária a aplicação dos filtros normalmente utilizados nos ensaios, quer para as antenas de 1,0 GHz, quer para as de 1,8 GHz. Para os filtros verticais FIR do tipo *low-pass* e *high-pass*, utilizou-se 3000 MHz e 500 MHz, respetivamente, para as antenas de 1,0 GHz, e 5000 MHz e 500 MHz, respetivamente, para as antenas de 1,8 GHz. No caso dos filtros verticais IIR do tipo *low-pass* e *high-pass*, utilizou-se 1000 MHz e 100 MHz, respetivamente, para as antenas de 1 GHz, e 2000 MHz e 100 MHz, respetivamente, para as antenas de 1,8 GHz.

Em cada teste feito com as antenas, foram realizadas três medições em condições diferentes, de modo a que se pudesse observar melhor a posição da superfície no registo. Para a primeira medição foi colocada na superfície do modelo físico, uma placa metálica de grandes dimensões, com o propósito de localizar essa superfície, dado que o metal representa o refletor ideal e a amplitude da onda refletida nele é maior. Relativamente à segunda medição, foi colocada uma placa metálica de menores dimensões, para detetar, simultaneamente, a reflexão da superfície e a reflexão do fundo da amostra.

A terceira e última medição foram feitas sem qualquer placa metálica na superfície, para a reflexão do fundo estar mais visível.

Para as antenas de 1 GHz a janela de visualização que se teve em conta foi de 20 ns enquanto para as antenas de 1,8 GHz foi de 12 ns. No entanto, houve ensaios onde se teve de aumentar a janela de visualização no caso das antenas de 1,8 GHz, de maneira a que se conseguisse apanhar a reflexão do fundo da caixa. Na Figura 4.11 é possível visualizar a reflexão da superfície e do alumínio:

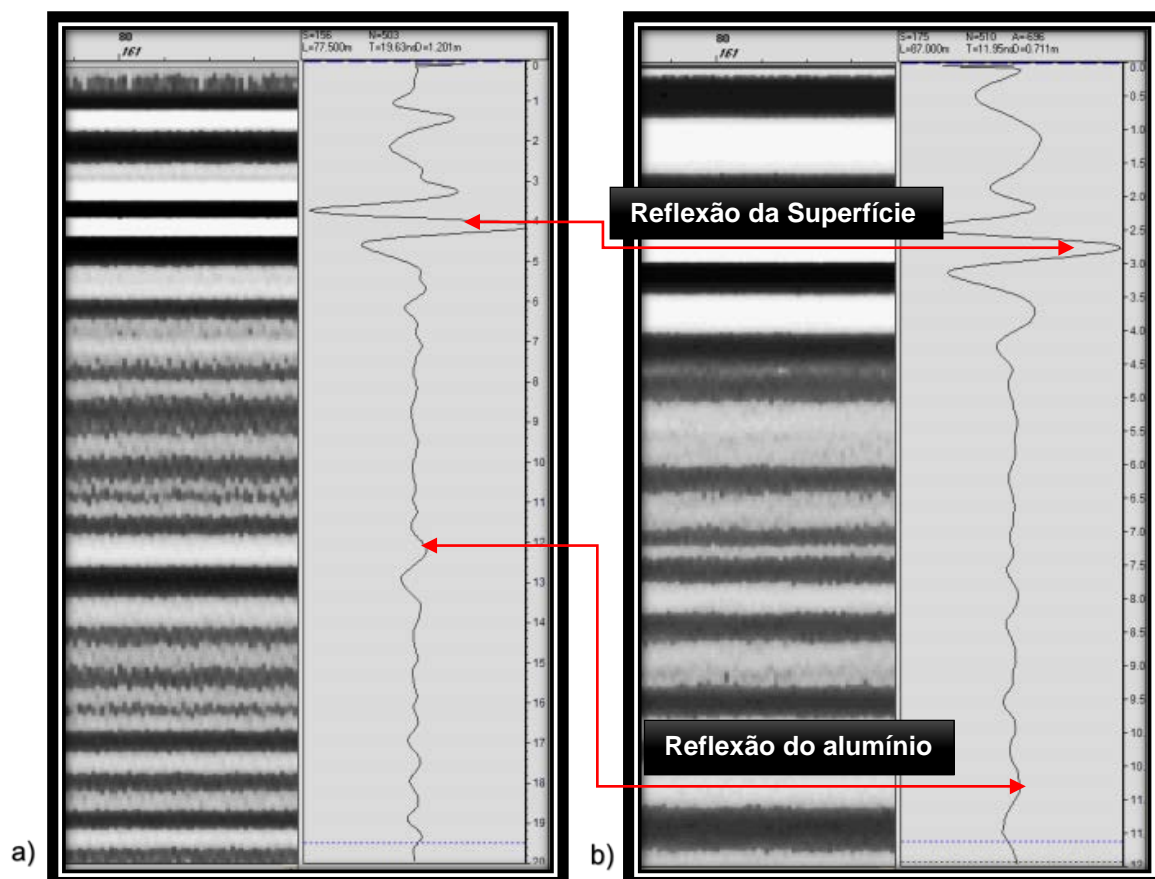


Figura 4.11. Janela de visualização que foi utilizada, com a reflexão da superfície e do alumínio do fundo da caixa; a) antenas de 1 GHz; b) antenas de 1,8 GHz;

#### 4.4.2 SIR 10H (GSSI) E ANTENAS EM CONTATO COM A SUPERFÍCIE

O sistema de aquisição *SIR 10H da GSSI* é composto por uma unidade central de controlo com a capacidade de transmissão, receção e registo de sinais, uma unidade de visualização dos registos, cabos de ligação e antenas com frequências de 500 MHz e de 900 MHz (modelos 3102A e 3101D, respetivamente), que funcionam em contato com a superfície, *ground coupled*. Os registos foram analisados com recurso ao programa *Railwaydoctor* (Silvast, et al., 2006).

A unidade de recepção amplifica os sinais captados de onde são enviados para a unidade de controlo onde são digitalizados, formatados e armazenados em memória. Ao mesmo tempo, os sinais são enviados para um ecrã, podendo ser observados em tempo real durante a medição (Fortunato, 2005).

As antenas utilizadas nesse caso, relativamente às antenas anteriormente mencionadas, são de frequência mais baixa conseguindo assim atingir maiores profundidades, mas com uma resolução menor.

Como aconteceu no sistema anterior (SIR 20), também neste é necessário aplicar filtros, de modo a que se consiga melhorar os registos feitos pelo Radar de prospeção.

Em cada uma das antenas, foram aplicados filtros, valores distintos para os diferentes parâmetros. Para a antena de 500 MHz utilizou-se uma janela de visualização de 40 ns, os filtros verticais aplicados foram de 800 MHz e de 100 MHz, enquanto os filtros horizontais foram de 5 MHz. Para esta antena foi utilizado um aumento da amplitude feito em cinco pontos: -4, 0, 8, 17 e 25, valores definidos antes do início dos ensaios.

Para a antena de 900 MHz utilizou-se uma janela de visualização de 20 ns, os filtros verticais aplicados foram de 1800 MHz e de 225 MHz, enquanto os filtros horizontais foram de 3 MHz.

Em cada um dos ensaios foram registadas 2 medições, sendo a primeira com os parâmetros acima referidos, enquanto para a segunda medição reduziu-se a janela de visualização em cada uma das antenas de maneira a isolar o essencial (reflexão do fundo e reflexão da superfície). Foi também reduzido para dois o número de pontos de aumento de amplitude na antena de 500 MHz. Pode-se ver de seguida na Figura 4.12, a reflexão da superfície e do alumínio para os casos da antena de 500 MHz e de 900 MHz.

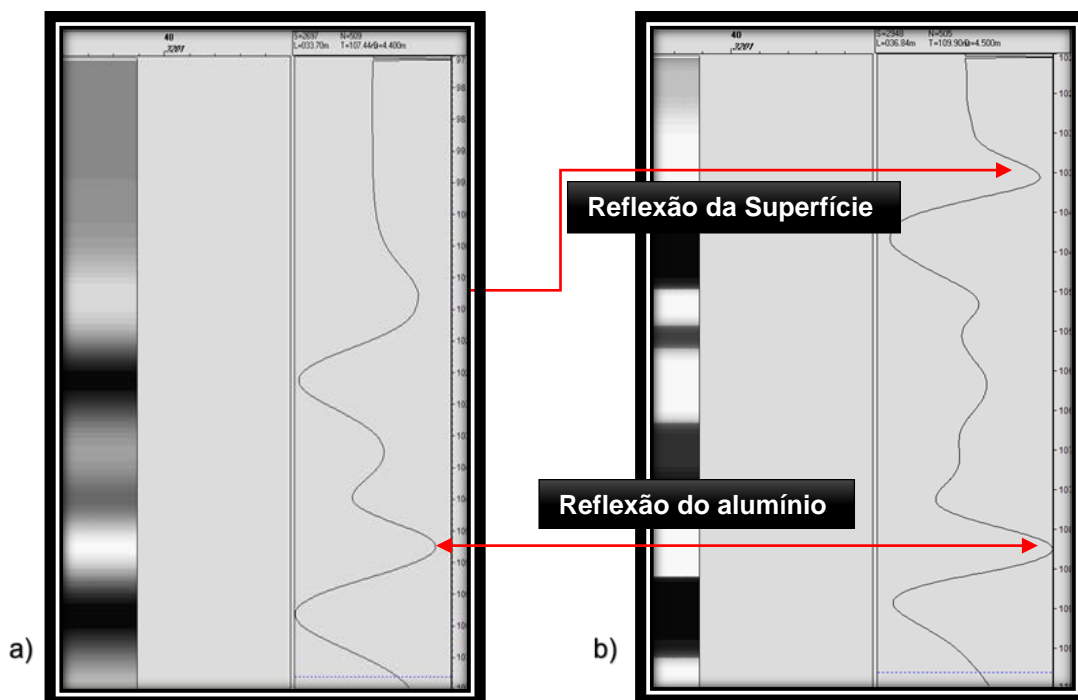


Figura 4.12. Janela de visualização que foi utilizada, com a reflexão da superfície e do fundo da caixa; a) antena de 500 MHz; b) antena de 900 MHz;



#### 4.4.3 IDS E ANTENA SUSPENSA

O sistema *IDS (Ingegneria Dei Sistemi)* é constituído por uma unidade central de controlo, um portátil para a visualização dos registos, cabos de ligação e por uma antena com frequência de 400 MHz (modelo TR400). Os registos medidos foram analisados com recurso ao programa *Railwaydoctor*.

Com este equipamento foram feitas medições com a antena suspensa através de um mecanismo artesanal, diferente para cada um dos modelos físicos relativos aos diferentes casos de estudo dos casos de estudo. Foram também feitos ensaios com a antena em contato com a superfície. No caso das medições com a antena suspensa, a distância a que esta se encontrava da superfície dos modelos físicos, foi aproximadamente a mesma da que esta se encontra do balastro quando é instalada no equipamento EM 120 para realização de medições em campo, pela REFER. Pode-se observar melhor na Figura 4.13 a antena da IDS apoiada e suspensa, bem como o registo feito pelo georadar relativo a cada posição.

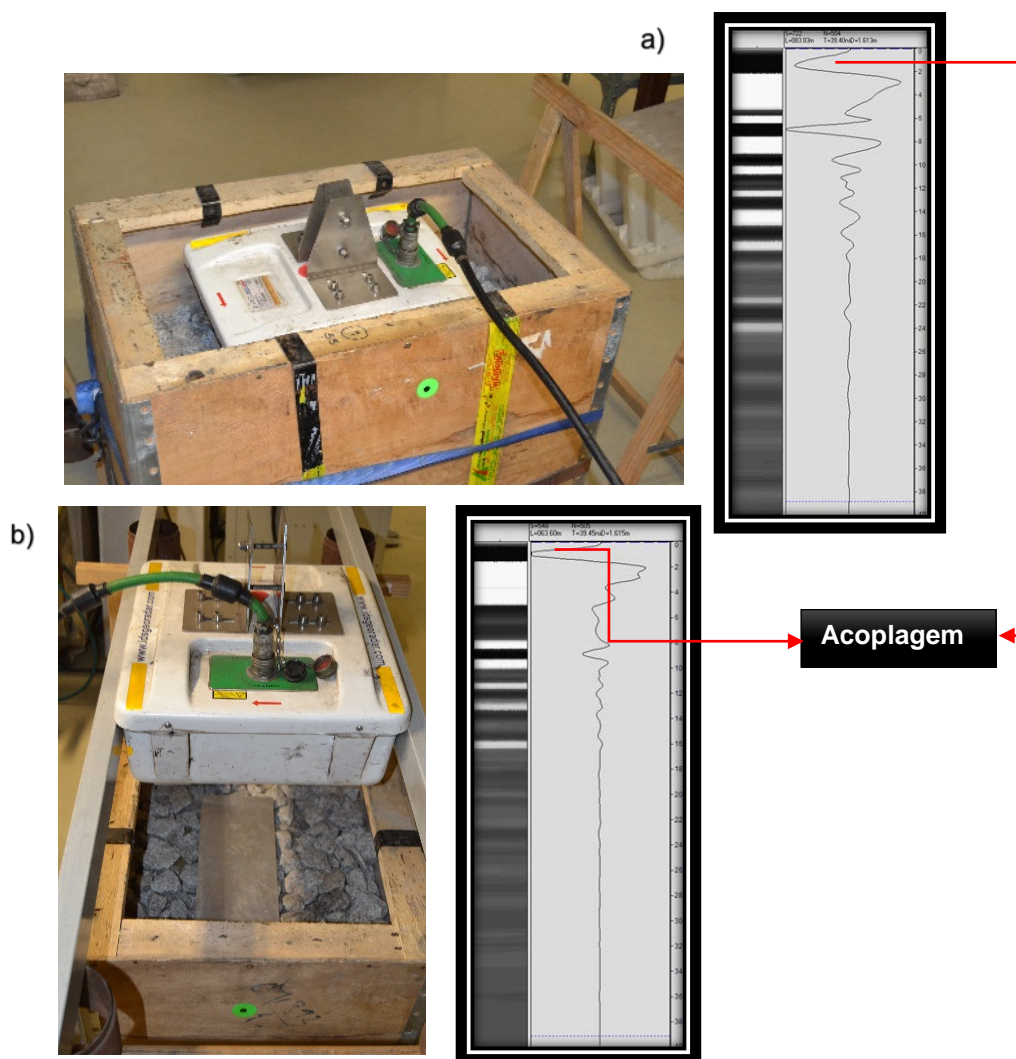


Figura 4.13. Medições feitas com o equipamento IDS e exemplo de registos recebidos; a) antena apoiada; b) antena suspensa

## 4.5 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DAS CONSTANTES DIELÉTRICAS

Relativamente ao cálculo das constantes dielétricas, o procedimento é semelhante quando se trata das antenas relativas aos sistemas da GSSI. No entanto, a diferença que existe entre as antenas de 500 MHz e de 900 MHz (SIR 10H), quando comparadas com as antenas de 1,0 GHz e de 1,8 GHz (SIR 20), é devido ao fato de estas se encontrarem apoiadas ou suspensas.

Esta diferença irá incidir na localização da reflexão da superfície, em que para as antenas de 500 MHz e 900 MHz coincidirá com o impulso da antena (primeiro pico) e para as antenas de 1,0 GHz e de 1,8 GHz estará localizado mais abaixo do impulso da antena, dado o percurso da onda pelo ar.

Depois de localizar a superfície, consegue-se saber também onde se encontra a reflexão do fundo da amostra.

Depois de localizar a superfície e o fundo da amostra, é feita a diferença de tempo de percurso da onda entre esses, em nano segundos (ns), de modo a saber o tempo que a onda emitida pela antena demora a atravessar a camada:

$$T = R - Z \quad (9)$$

Onde:

$T$  – tempo que a onda demora a atravessar a camada (ida e volta) (ns);

$R$  – tempo que a onda demora a chegar ao fundo da amostra (ns);

$Z$  – tempo que a onda demora a atingir a superfície (ns).

De seguida, calcula-se a constante dielétrica relativa:

$$K = \left( \frac{v \times T}{2 \times e} \right)^2 \quad (10)$$

Onde:

$K$  – constante dielétrica relativa;

$v$  – velocidade da luz (m/s);

$T$  – tempo que a onda demora a atravessar a camada (ida e volta) (ns);

$e$  – espessura da camada (m).

Quando se trata do cálculo de constantes dielétricas dos registos feitos com a antena da IDS, estando esta suspensa, a grande dificuldade está relacionada com a localização da superfície.

Para resolver esta situação, foi necessário adotar um método diferente no cálculo das constantes dielétricas. Retirou-se assim o valor da acoplagem, que é a onda direta entre a antena emissora e a recetora, em nano segundos, sendo feito de seguida o cálculo do tempo em que a onda percorre o ar, antes de encontrar a superfície. Consequentemente, sabendo qual a distância a qual a antena se encontra da superfície, ao se somar estes dois valores obtém-se a localização da superfície, em termos de tempo de percurso da onda, em ns.

$$Z = A + A_r \quad (11)$$

Onde:

*Z – tempo que a onda demora a atingir a superfície (ns);*

*A – tempo relativo à acoplagem (ns);*

*A<sub>r</sub> – tempo que demora a onda a percorrer o Ar (ns);*

Posteriormente, é retirado do tempo correspondente à reflexão do fundo da amostra o valor acima referido, do percurso da onda até a superfície. É calculado então o tempo que a onda demora a atravessar a camada segundo a fórmula (9) atrás referida.

Com base nesse tempo é feito o cálculo da constante dielétrica relativa do material percorrido, segundo a fórmula (10) atrás referida.

No caso da antena da IDS, quando esta se encontra apoiada, o cálculo é semelhante ao do sistema GSSI (SIR 10H), sendo o cálculo feito tendo em conta a reflexão da acoplagem e a do fundo da amostra.

## 4.6 REALIZAÇÃO DE ENSAIOS E ANÁLISES DOS RESULTADOS

O objetivo principal do trabalho desenvolvido nessa dissertação foi a determinação do valor das constantes dielétricas para os diferentes materiais usados.

Apresentam-se de seguida os principais resultados obtidos relativamente aos diferentes casos de estudo, cujo procedimento de ensaios foi apresentado anteriormente. É feita também uma análise desses resultados e conclusões referentes aos mesmos.

### 4.6.1 ESTUDO DO BALASTRO LIMPO – CASO DE ESTUDO 1

Foram feitos diferentes ensaios para o estudo do balastro limpo, já mencionados anteriormente. Os principais resultados obtidos nesses ensaios são apresentados de seguida quer em gráfico, quer em tabela.





Figura 4.14. Molhagem do balastro e sua compactação para o caso de estudo do balastro limpo

Para o estudo do balastro limpo testaram-se os três sistemas com as antenas correspondentes a cada um. Obtiveram-se resultados realistas e coerentes para as diferentes antenas utilizadas, embora, para a antena de 500 MHz, no caso do balastro saturado, o valor difere relativamente aos outros.

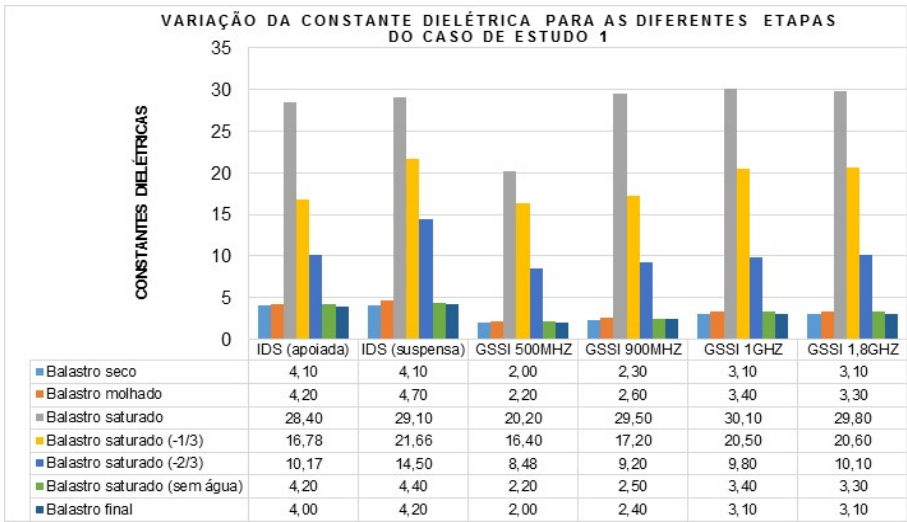


Figura 4.15. Variação da constante dielétrica para as diferentes etapas do caso de estudo 1

Na parte final do ensaio, depois da imersão e da evacuação da água toda da amostra, foram feitos ensaios diariamente, sempre à mesma hora, até o valor da constante dielétrica ter estabilizado. Estes valores são apresentados no Quadro 4.4. e Figura 4.16:

Quadro 4.4. Valores de constantes dielétricas obtidas durante a secagem do balastro limpo

	<b>Balastro (s/ água)</b>	<b>+ 24 Horas</b>	<b>+ 48 Horas</b>	<b>+ 120 Horas</b>	<b>+ 144 Horas</b>	<b>+ 168 Horas</b>	<b>+ 192 Horas</b>
<b>IDS (apoiada)</b>	4,20	4,10	4,10	4,00	4,10	4,00	4,00
<b>IDS (suspensa)</b>	4,40	4,40	4,20	4,40	4,30	4,40	4,20
<b>GSSI 500MHZ</b>	2,20	2,10	2,10	2,00	2,00	2,00	2,00
<b>GSSI 900MHZ</b>	2,50	2,40	2,40	2,30	2,30	2,30	2,40
<b>GSSI 1GHZ</b>	3,40	3,30	3,10	3,20	3,10	3,20	3,10
<b>GSSI 1,8GHZ</b>	3,30	3,20	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10

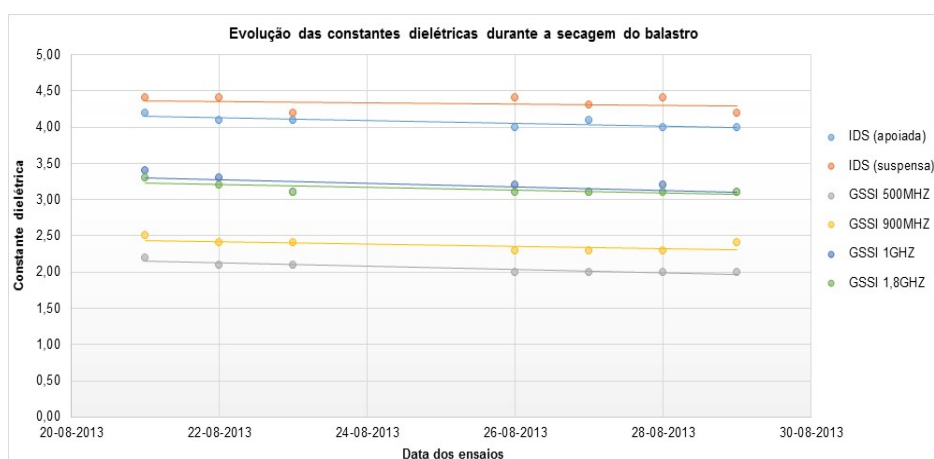


Figura 4.16. Gráfico com a evolução da constante dielétrica, durante a secagem do balastro

Posteriormente, para cada uma das antenas, foi calculada a média entre a constante dielétrica obtidas para um balastro limpo e seco, no início dos ensaios e a obtida após secagem do material, com o objetivo de obter um valor de constante dielétrica mais próximo do real. Os valores médios assim calculados são apresentados no gráfico abaixo.

Como se pode observar no gráfico, para o sistema IDS com uma frequência de 400 MHz, o balastro tende a ter uma constante dielétrica de cerca de 4, sendo superior às constantes dielétricas das outras antena, com maiores frequências. No entanto, para as restantes antenas, a constante dielétrica do balastro aumenta com o aumento da frequência, variando entre 2,00 e 3,10.

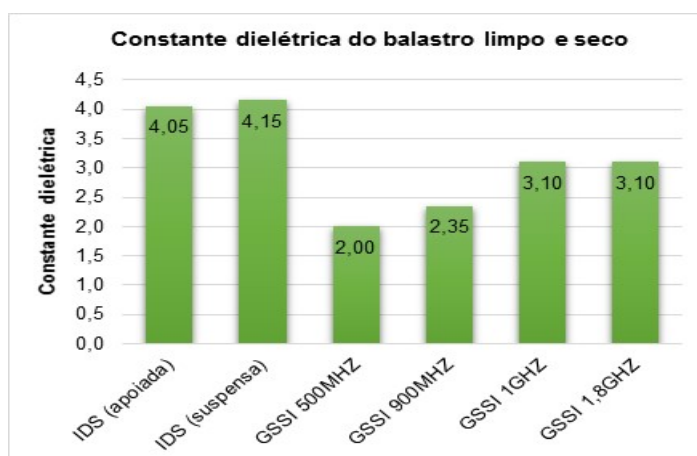


Figura 4.17. Constante dielétrica do balastro limpo e seco para diferentes antenas

## 4.6.2 ESTUDO DO SOLO – CASO DE ESTUDO 2

Relativamente ao estudo do solo, foram feitos ensaios para quatro teores em água (6%, 8%, 10% e 12%), sabendo que o teor em água ótimo é de 8,4%. Depois de montados os diversos modelos físicos, foram feitos testes com as antenas, tendo no final sido realizados ensaios com o equipamento Gamadensímetro (TROXLER) e com a garrafa de areia, de maneira a determinar o teor em água, como foi dito anteriormente.

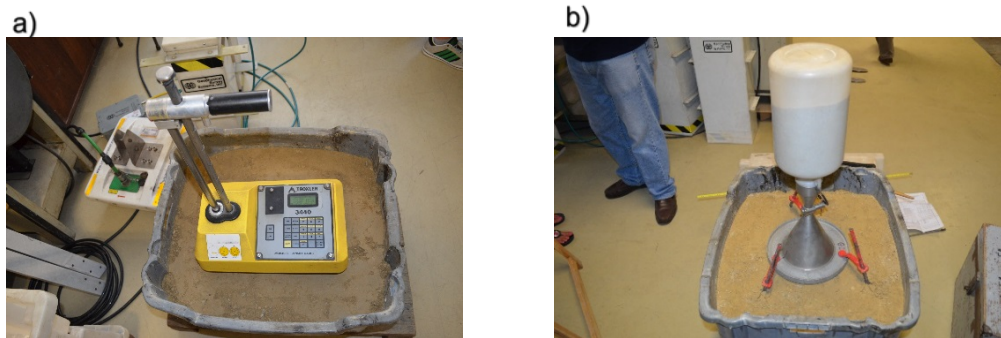


Figura 4.18. Equipamentos usados no estudo do solo; a) Gamadensímetro (TROXLER); b) ensaio da garrafa de areia;

Com a determinação do teor em água através dos dois equipamentos, apresentam-se de seguida, em gráfico e em tabela, as constantes dielétricas relativas ao teor em água obtido pelo equipamento Gamadensímetro (TROXLER), e pelo ensaio da garrafa de areia.

Quadro 4.5. Valores da constante dielétrica para diferentes teores em água obtidos pelo equipamento Gamadensímetro

	12% de água	12% de água + 24 Horas	10% de água	10% de água + 24 horas	10% de água + 168 horas
<b>Teor em água medido (%)</b>	14,40	13,10	10,50	10,40	8,60
<b>IDS (apoiada)</b>	18,34	17,97	16,50	16,18	15,86
<b>IDS (suspensa)</b>	18,61	18,61	15,37	15,02	15,06
<b>GSSI 1,0 GHZ</b>	14,76	14,59	13,04	12,37	12,51
<b>GSSI 1,8 GHZ</b>	15,13	15,05	13,08	13,01	12,58

Quadro 4.6. Valores da constante dielétrica para diferentes teores em água obtidos pelo equipamento Gamadensímetro

	8% de água	6% de água	6% de água + 72 horas	6% de água + 96 horas
<b>Teor em água medido (%)</b>	7,70	5,95	5,00	4,90
<b>IDS (apoiada)</b>	11,68	9,38	9,38	9,38
<b>IDS (suspensa)</b>	10,15	9,26	8,73	8,15
<b>GSSI 1,0 GHZ</b>	8,62	8,31	7,97	6,60
<b>GSSI 1,8 GHZ</b>	8,77	8,26	7,83	6,89

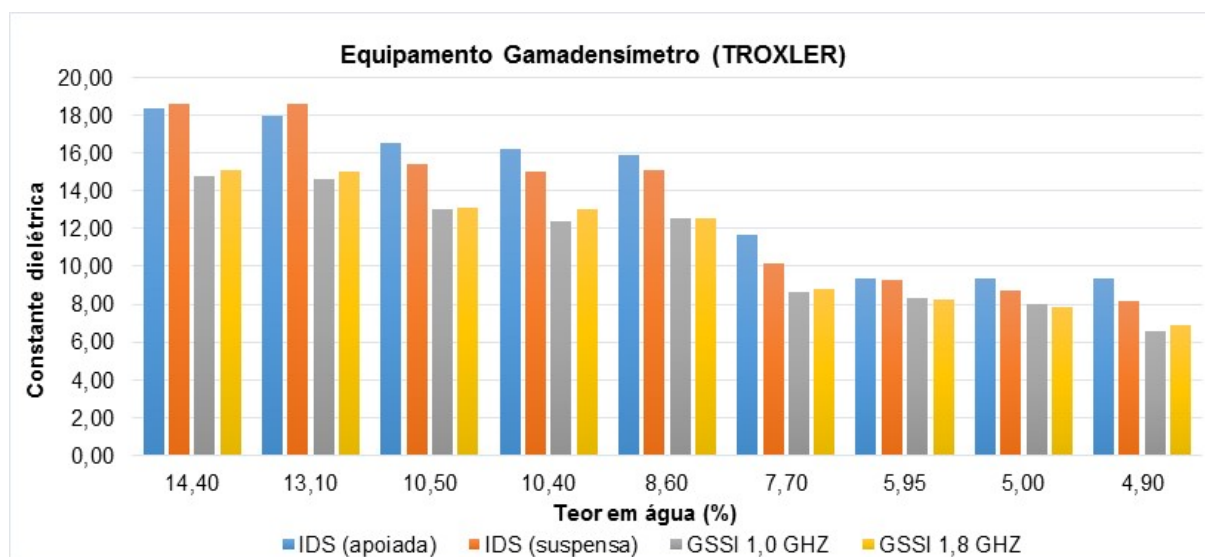


Figura 4.19. Variação da constante dielétrica com o teor em água obtido através do equipamento Gamadensímetro

Quadro 4.7. Valores da constante dielétrica para diferentes teores em água obtidos pelo ensaio da garrafa de areia

	12% de água + 24 horas	10% de água + 168 horas	8% de água	6% de água + 96 horas
<b>Teor em água medido (%)</b>	12,60	8,60	7,40	4,20
<b>IDS (apoiada)</b>	17,97	15,86	11,68	9,38
<b>IDS (suspensa)</b>	18,61	15,06	10,15	8,15
<b>GSSI 1,0 GHZ</b>	14,59	12,51	8,62	6,60
<b>GSSI 1,8 GHZ</b>	15,05	12,58	8,77	6,89

Como esperado, é possível observar o aumento da constante dielétrica com o aumento do teor em água. No entanto, relativamente à antena de 1,0 GHz, nos 10% de água, existe um aumento de constante, podendo indicar apenas um erro na determinação desse valor.

Pode-se observar, que a constante dielétrica para a antena da IDS é sempre superior as constantes dielétricas das antenas de 1,0 GHz e de 1,8 GHz, como já observado no caso de estudo do balastro limpo.

Foram feitos ensaios no solo com as antenas de 500 MHz e de 900 MHz, no entanto, surgiram dificuldades na obtenção de resultados, devido à localização da reflexão da superfície. Esta dificuldade será explicada mais à frente, no subcapítulo sobre cuidados a ter em conta na medição.

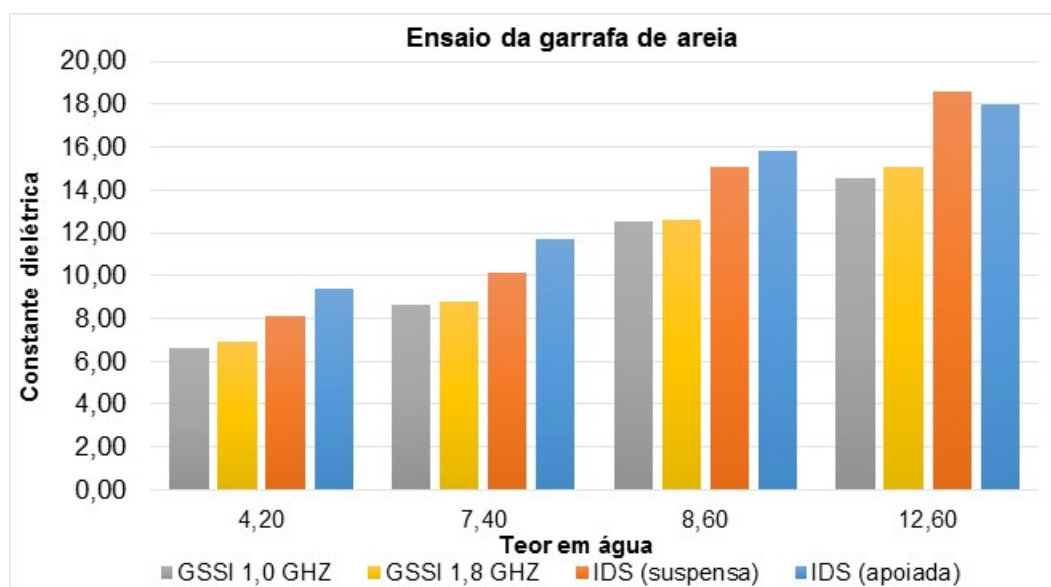


Figura 4.20. Variação da constante dielétrica com o teor em água obtido através do ensaio da garrafa de areia

#### 4.6.3 ESTUDO DO BALASTRO CONTAMINADO – CASO DE ESTUDO 3

Para o estudo do balastro contaminado, foram executados modelos físicos com cinco níveis de contaminação, os quais foram já referidos anteriormente juntamente com o procedimento adotado.

Os resultados obtidos relativamente a estes ensaios feitos em laboratório para o balastro contaminado são apresentados de seguida, bem como algumas conclusões e algumas explicações sobre a apresentação dos dados em gráficos.

No entanto, antes de prosseguir com os resultados propriamente ditos, ir-se-á falar sobre como foi feita a adição de água em cada índice de contaminação.

No índice 1, tendo sido apenas utilizado o teor em água ótimo, foram feitos dois ensaios com as antenas, com um intervalo de 72 horas, e posteriormente foi calculada a média dos dois valores medidos para cada antena. Estes valores são apresentados no gráfico seguinte.

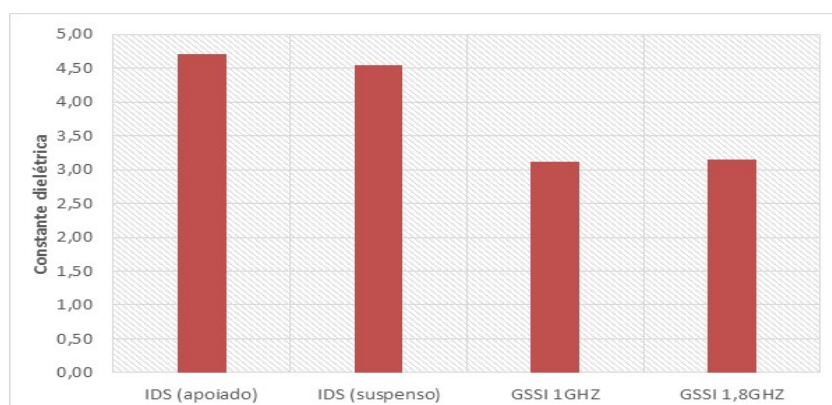


Figura 4.21. Valores de constante dielétrica para um balastro com índice 1 e teor em água de 8,4%

Relativamente aos outros índices de contaminação, os resultados obtidos serão apresentados em conjunto mais à frente, como já referido.

Para os índices de contaminação 6, 15 e 35 o modelo físico foi construído com um teor em água de 6%. A obtenção do teor em água imediatamente superior ao valor a ensaiar foi através da adição de água na superfície do provete, em quantidade correspondente a cada incremento de teor em água. Através deste procedimento foram simulados quatro teores em água (6%, 8%, 10% e 12%). Nesses modelos físicos foram realizados ensaios com todas as antenas do radar, para cada um dos teores em água referidos, em aquando a colocação da água e após 2 horas. Fez-se deste modo, para dar possibilidade a que a água se infiltrasse no solo de contaminação de uma forma relativamente uniforme. Com estes dois valores obtidos para cada teor em água, fez-se a média e esses resultados apresentam-se na tabela e nos gráficos seguintes.

Quadro 4.8. Valor das constantes dielétricas obtidas para os diferentes índices de contaminação e para diferentes teores em água, para a antena da IDS, suspensão.

	Teores em água			
	6,0%	8,0%	10,0%	12,0%
Índices de contaminação	Constantes dielétricas			
1	-	4,55	-	-
6	4,91	5,09	5,10	5,25
15	5,46	6,05	6,34	6,13
35	7,09	7,81	8,25	8,56
55	7,41	7,95	9,10	9,49



Relativamente ao índice 55, para cada um dos teores em água referidos anteriormente, foi apenas feito um ensaio com as antenas, após duas horas da adição de água, dada a acumulação de água à superfície do provete devido à grande quantidade de solo. A realização passado duas horas garantia uma melhor infiltração da água adicionada no solo do provete.

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos para os quatro índices de contaminação e para os quatro teores em água para cada uma das antenas utilizadas.

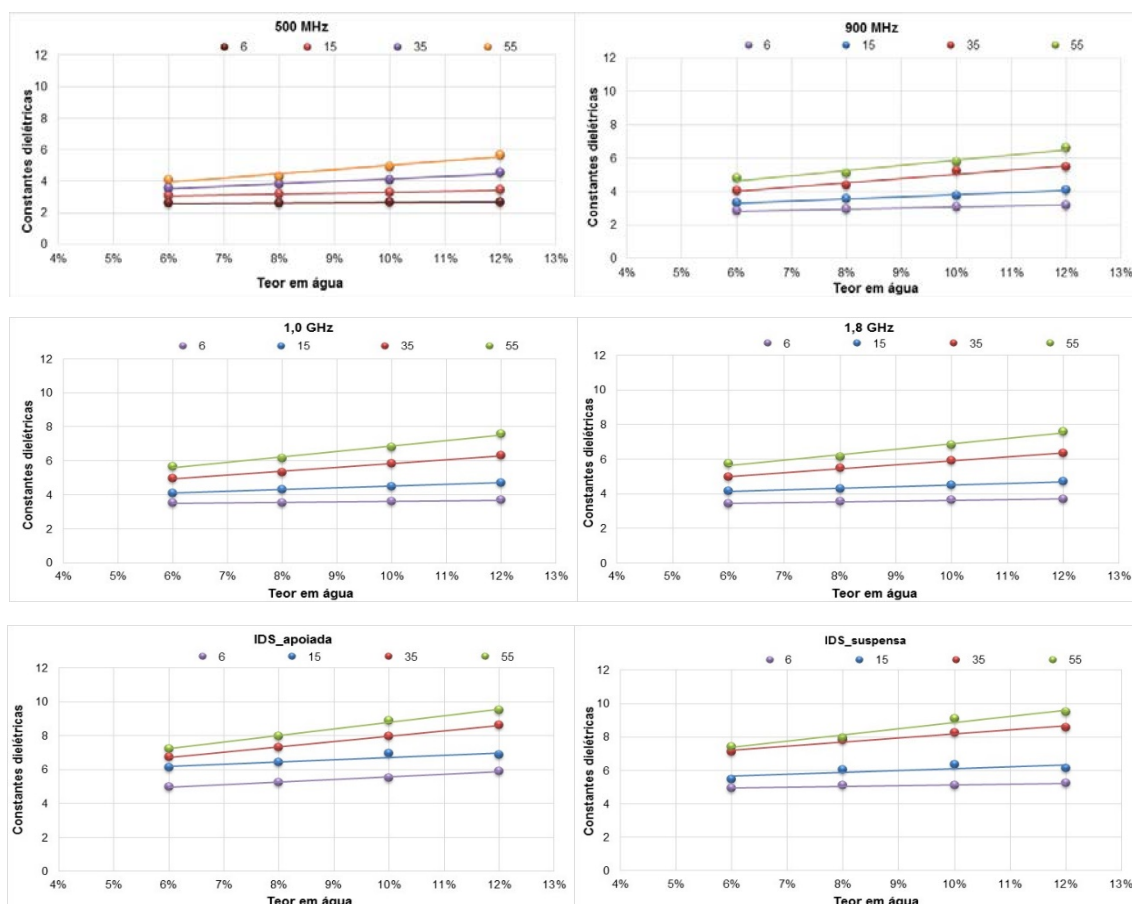


Figura 4.22. Variação da constante dielétrica com o teor em água para cada nível de contaminação, para as diferentes antenas utilizada

Nos gráficos da Figura 4.23 apresenta-se o aumento da percentagem da constante dielétrica, relativamente a um índice de contaminação de 6 quando se faz aumentar este até 55, para cada teor em água.

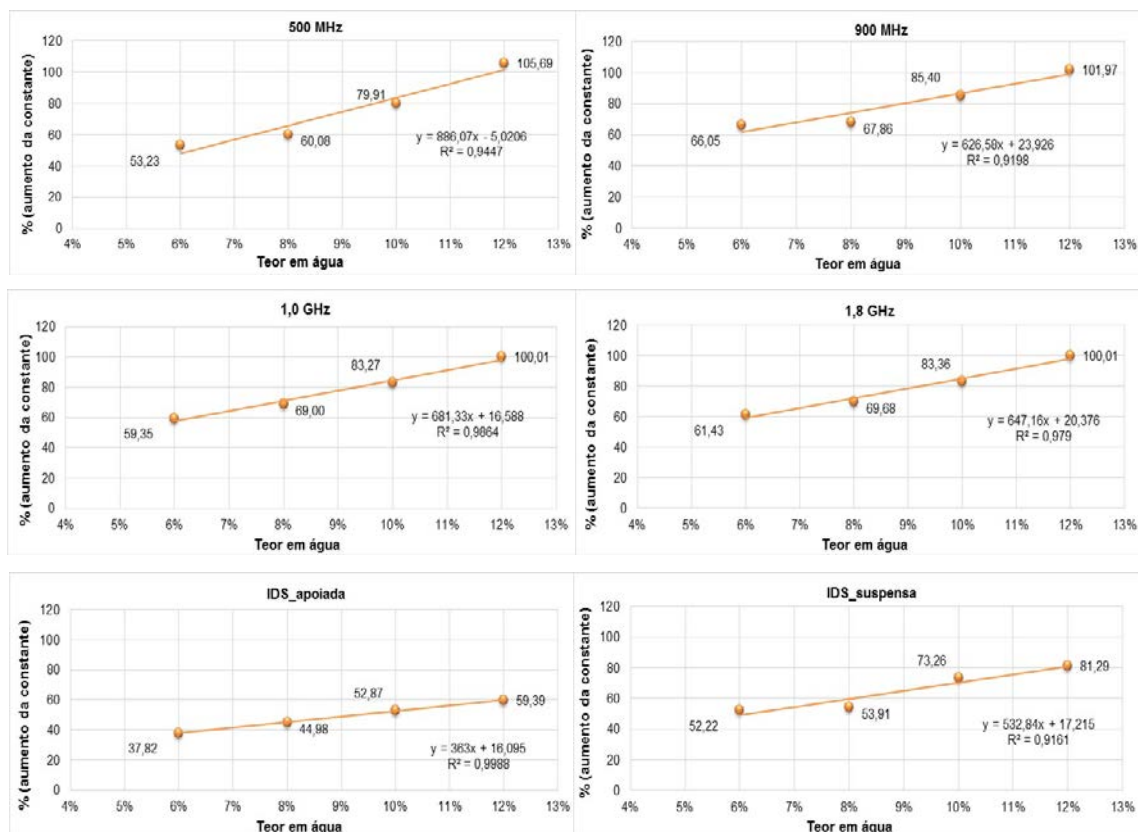


Figura 4.23. Variação da percentagem da constante dielétrica relativamente a um índice de contaminação de 6 quando se aumenta este até 55, para cada teor em água, para as diferentes antenas utilizadas

Consegue-se ver que esse aumento para o último teor em água chega a ser de 100%, exceto no caso da antena da IDS.

Para um teor de água mais baixo o aumento da constante encontra-se entre os 50% e os 70%, ou seja, mesmo para um teor de água bastante pequeno, o aumento que haverá na constante dielétrica quando existe uma variação no índice de contaminação no balastro, será de pelo menos metade. Este fenómeno acontece em todos os gráficos ilustrados acima, exceto no caso da IDS apoiada.

Pode-se afirmar que, geralmente, a variação da constante dielétrica com o teor em água é maior para frequências de antenas mais altas, quando se compara as antenas de 500 MHz e 400 MHz, com as de 900 MHz, 1,0 GHz e 1,8 GHz.

Para as antenas de 1,0 GHz e de 1,8 GHz, verifica-se que os valores da variação são bastante próximos, devido às constantes dielétricas darem valores semelhantes.

No caso da IDS apoiada, os valores obtidos diferem dos das outras antenas, podendo-se concluir que, quando apoiada, essa antena dá resultados muito diferentes das restantes antenas.

Para a antena da IDS, estando está suspensa, verifica-se que os valores obtidos aproximam-se dos das outras antenas, no entanto, para um teor de doze por cento, o aumento da percentagem não vai além de oitenta e cinco. Esta diferença que existe pode residir no fato de que, ao possuir uma menor resolução (400 MHz), a contante dielétrica não variar tanto com a adição de água.



Consegue-se ver nos gráficos da Figura 4.24, o aumento da percentagem relativamente à constante dielétrica, relativamente a um teor em água de 6% quando se faz aumentar este até 12%, para cada índice de contaminação.

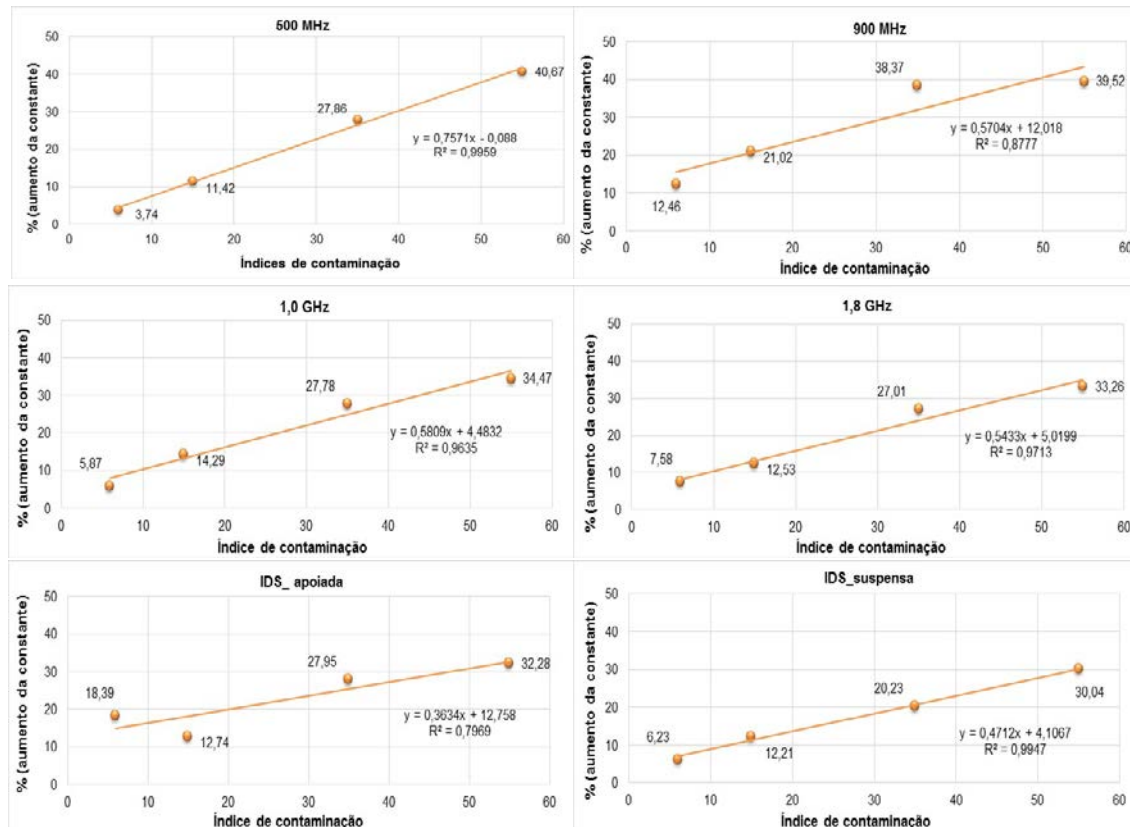


Figura 4.24. Variação da percentagem da constante dielétrica relativamente a um teor em água de 6% quando se aumenta este até 12%, para cada índice de contaminação, para as diferentes antenas utilizadas

Assim sendo, observa-se que quando o balastro se encontra bastante contaminado, mesmo que se aumente o teor em água, a constante nunca aumentará acima de 50%, contrariamente, ao que se verificou anteriormente.

Observa-se que, quando se tem um baixo nível de contaminação a constante dielétrica pouco ou nada se altera com a presença de água. Neste caso de estudo, com índice seis e aumentando o teor de água, o aumento da constante dielétrica é de cerca de 4% para a antena de 500 MHz e de 13% para a antena de 900 MHz.

Observa-se que no caso da antena da IDS apoiada os valores não são coerentes entre si, distanciando-se da linha de tendência. Como foi verificado anteriormente, a antena da IDS quando se encontra apoiada, acaba sempre por dar resultados diferentes das outras antenas.

Pode-se ver que para a antena da IDS suspensa, os valores aproximam-se dos das outras antenas, como observado anteriormente.

### Resultados obtidos para o balastro muito contaminado (Índice 55)

Apresenta-se de seguida o gráfico correspondente às constantes dielétricas obtidas para o índice 55 quando este se encontra encharcado e durante a secagem, em que no eixo horizontal está representado o intervalo entre as diferentes medições. A medição inicial foi feita na fase encharcada (0) e depois quase diariamente até a estabilização da constante dielétrica (23 dias).

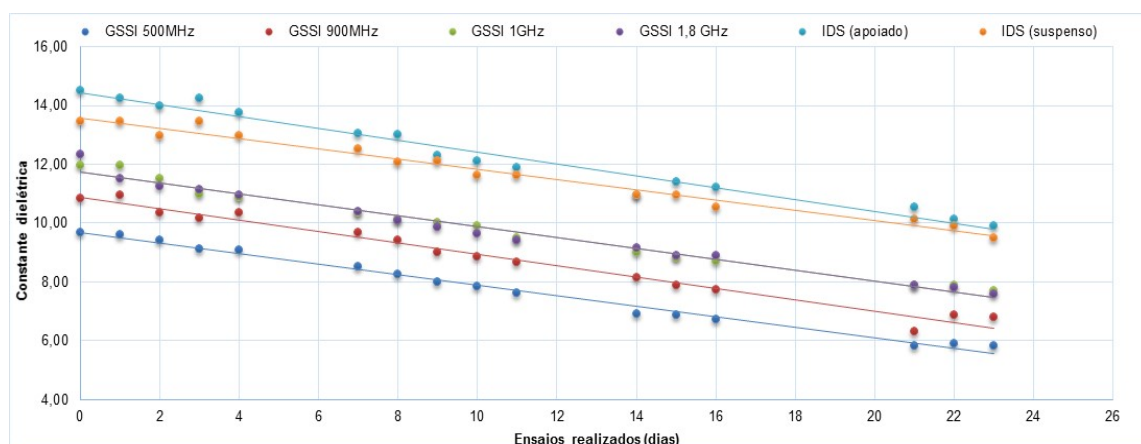


Figura 4.25. Valores de constante dielétrica, para um balastro índice 55 encharcado e sua secagem

Verifica-se que a variação das constantes dielétricas tende a ter uma evolução semelhante para as antenas de 500 MHz, 900 MHz, 1,0 GHz e de 1,8 GHz, e que no caso das duas últimas, acaba por ser coincidente. No entanto, para a antena da IDS, essa evolução tem um desenvolvimento diferente.

Depois das conclusões a que se chegaram, foi analisado também o desvio padrão relativo às diferentes antenas. Tendo em conta as diferentes constantes dielétricas obtidas para os vários índices de contaminação e para cada antena, determinou-se o desvio padrão de maneira a que se conseguisse saber qual a antena onde haverá uma maior variação na constante.

Nos gráficos apresentados na Figura 4.26, observa-se que para o caso da antena da IDS, quando esta se encontra suspensa, vai haver um maior aumento da constante à medida que se vai aumentando o nível de contaminação, quando comparada com as outras antenas. É no caso das antenas da IDS que se verifica uma maior variação nas constantes dielétricas para índices mais elevados de contaminação.

Observa-se que a evolução relativamente à antena de 1,0 GHz e de 1,8 GHz é bastante semelhante, como era de esperar.

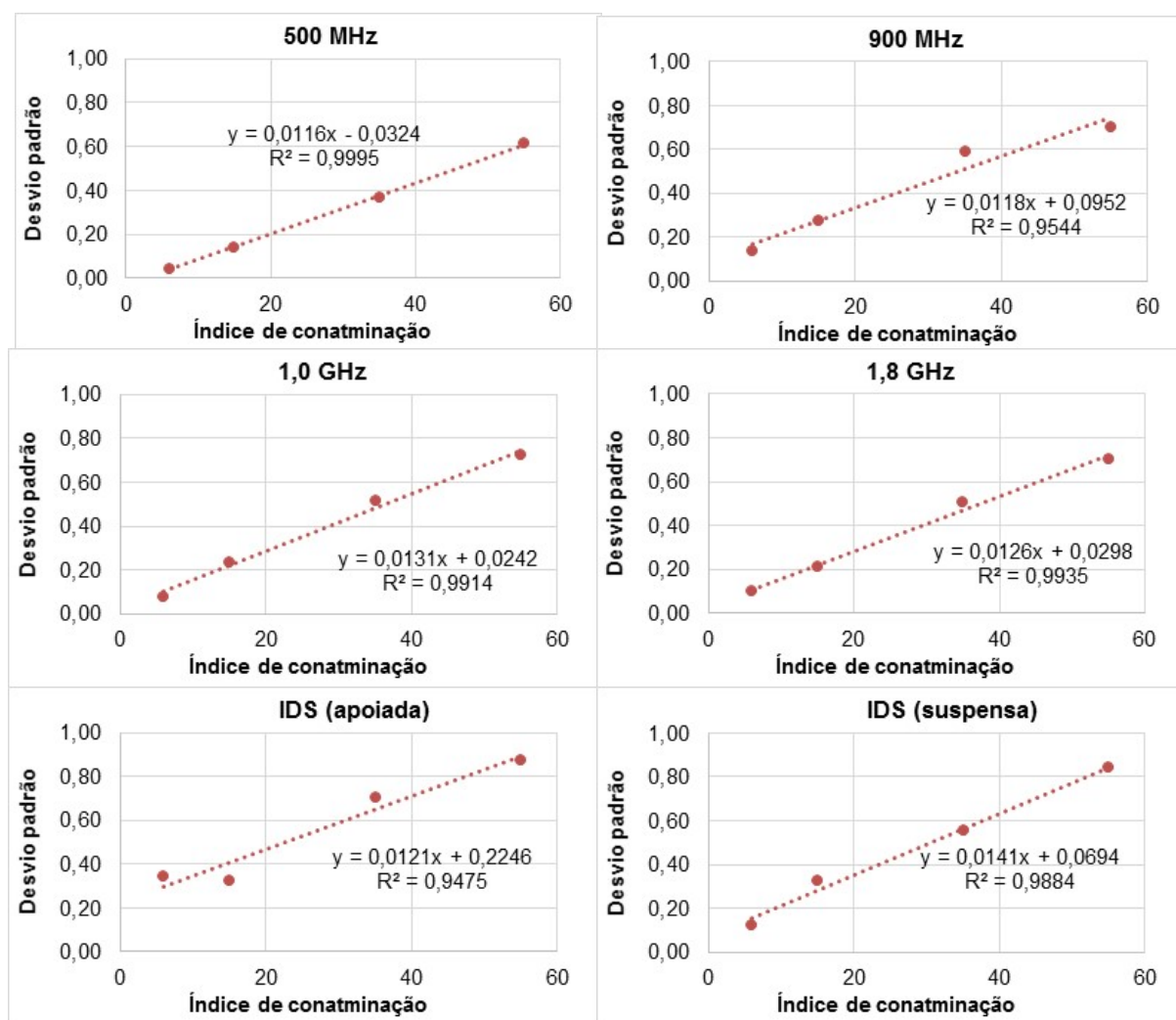


Figura 4.26. Evolução do desvio padrão para cada antenna, quando se varia o teor em água, para cada índice de contaminação

No gráfico a seguir (Figura 4.27), consegue-se visualizar qual a variação que pode existir entre constantes, para cada uma das antenas, desde um índice 6 com teor em água de 6%, até um índice 55 com um teor em água de 12%. É espectável que os valores das constantes dielétricas obtidos quando se analisa um balastro granítico sejam dentro desta gama de variação.

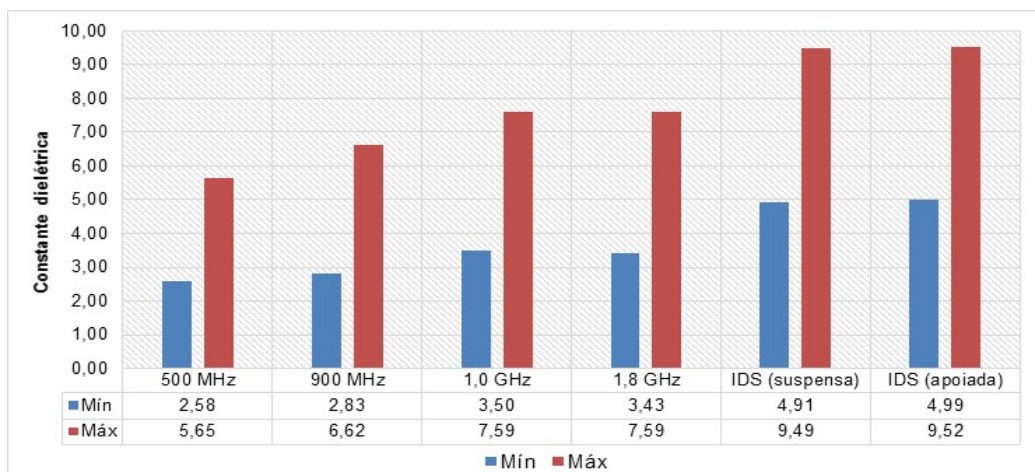


Figura 4.27. Variação das constantes dielétricas para cada antenna, tendo em consideração um balastro granítico

Observa-se ainda a diferença que existe relativamente às constantes dielétricas, quando se compara a antenna da IDS (suspensa) com as outras antenas, apresentado os limites máximos e mínimos, no gráfico seguinte. A antenna da IDS (apoiada) não está a ser apresentada, pois dá resultados menos coerentes, de quando se encontra suspensa, como verificado anteriormente. Mais refere-se que a antenna IDS não é utilizada como apoiada durante a realização das medições, mas sim, suspensa.

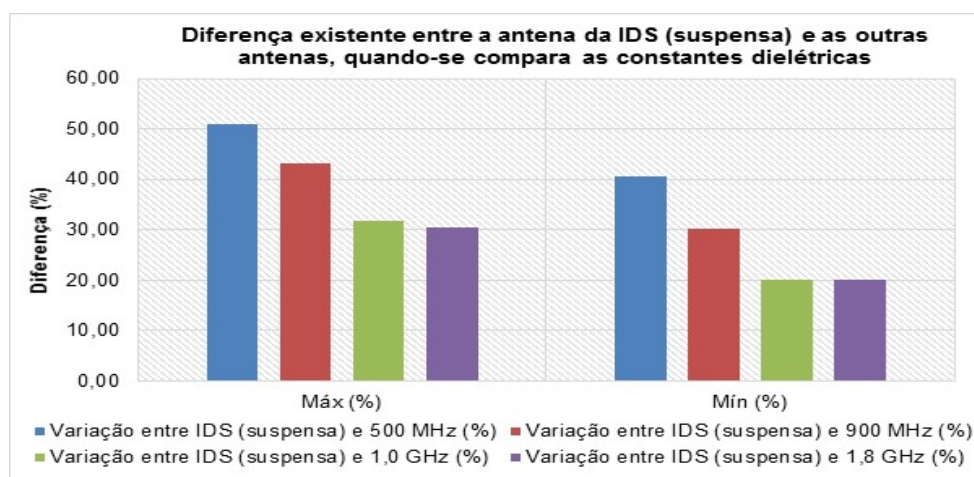


Figura 4.28. Diferença que existe entre as antenas da IDS (suspensa) e as outras antenas, quando se compara as constantes dielétricas

Apresentam-se de seguida os resultados a que se chegou, quando se compara a constante dielétrica para os diferentes índices de contaminação, para o mesmo teor em água (8%).

Quadro 4.9, Valor das constantes dielétricas para diferentes índices de contaminação e para o mesmo teor em água (8%), para a antena da IDS, suspensa

Índice de contaminação	Constante dielétrica
0	4,15 (*)
1	4,55 (**)
6	5,09
15	6,05
35	7,81
55	7,95

(\*) Balastro limpo e seco

(\*\*) Balastro com teor em água ótimo (8,4%)

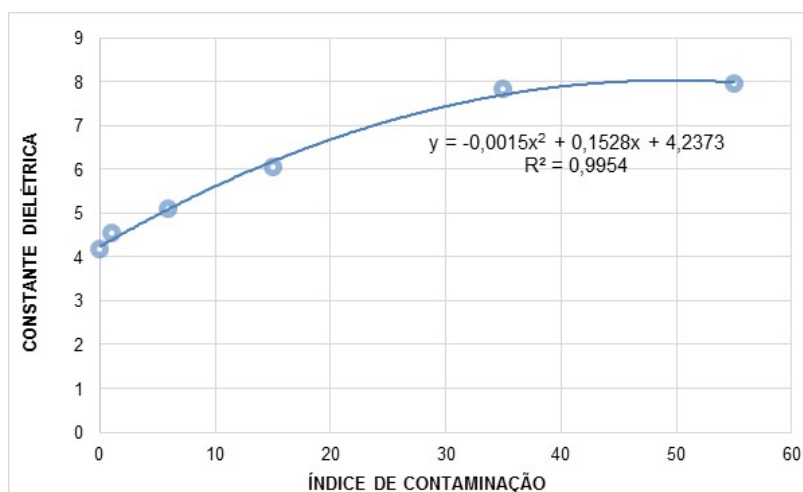


Figura 4.29. Valor das constantes dielétricas, para diferentes índices de contaminação a para o mesmo teor em água (8%)

Verifica-se que a constante dielétrica tende a estabilizar para balastros com elevado índice de contaminação.

## 4.7 CUIDADOS A TER EM CONTA NA MEDIÇÃO

Para os diferentes equipamentos utilizados, foi necessário ter em atenção alguns aspetos fundamentais, de maneira a que os resultados obtidos fossem fiáveis.

#### 4.7.1 SISTEMA GSSI (SIR – 10H) E ANTENAS EM CONTATO COM A SUPERFÍCIE

Para efetuar medições, quer seja em laboratório ou “*in situ*”, é sempre necessário saber a localização da superfície no perfil obtido. Saber onde se localiza, é o ponto mais importante para posteriormente conseguir-se obter valores de constante dielétrica coerentes. Seja qual for o sistema de GPR que se esteja a utilizar, este é um ponto que se tem de ter sempre em conta.

Devido a este aspeto importante, teve-se de repetir alguns ensaios (estudo do balastro limpo) tanto para a antena de 500 MHz como para a de 900 MHz, pois a reflexão da superfície não aparecia na janela de visualização. Na Figura 4.30 observa-se melhor a mudança que deve ser feita e tida em conta, de modo a permitir a visualização da superfície.

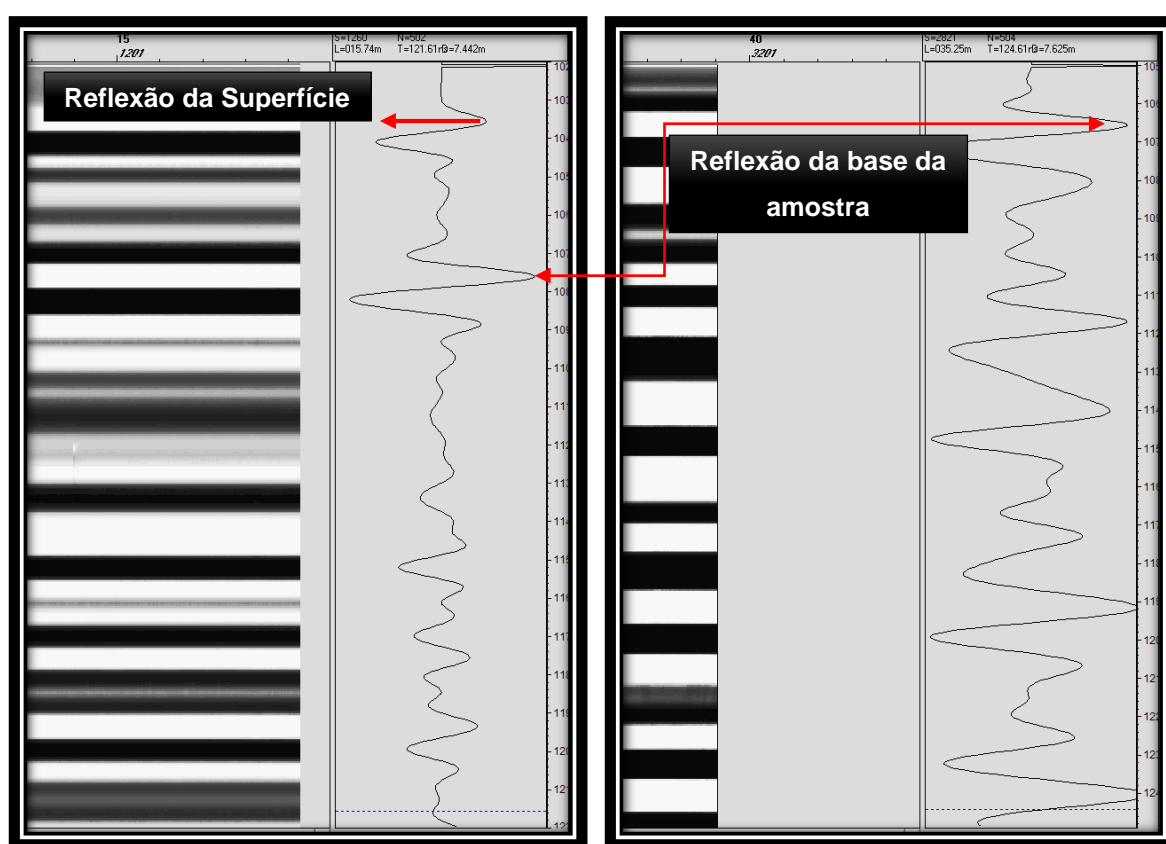


Figura 4.30. Visualização da mudança da posição da janela que se executou para visualizar corretamente a superfície da amostra

Outro aspeto que tem-se de ter em conta na medição está relacionado com a nossa janela de visualização, cuja dimensão deverá ser escolhida para apanhar o essencial para cada caso estudado (reflexão da superfície e reflexão da base da nossa amostra) de maneira a que não se retire um valor errado e se aproveite ao máximo a energia emitida pela antena. Na figura seguinte observa-se melhor a redução da janela de visualização.

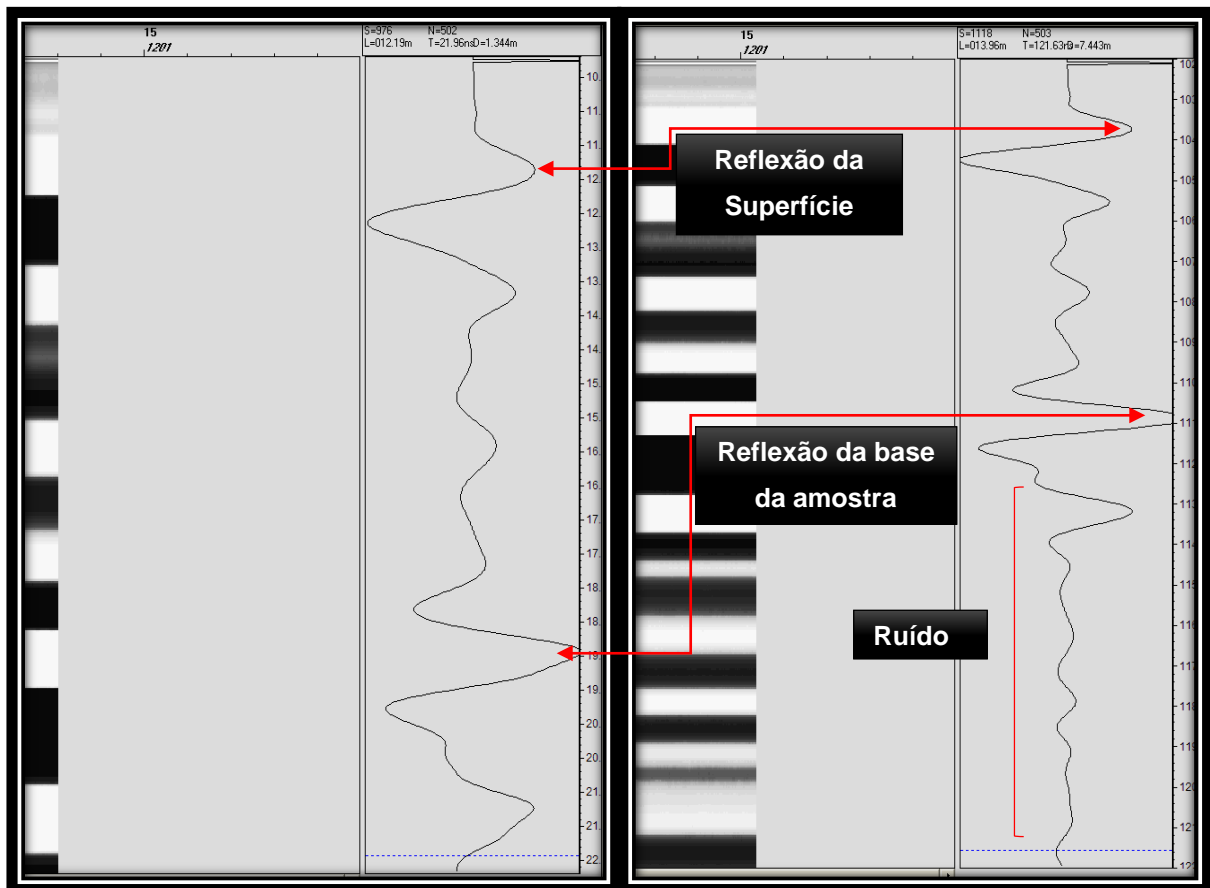


Figura 4.31. Exemplo de redução de uma janela de visualização, de maneira a termos o essencial

#### 4.7.2 SISTEMA GSSI (SIR – 20) E ANTENAS SUSPENSAS

Ao contrário dos outros sistemas utilizados, cada conjunto de antenas suspensas é constituído por duas antenas separadas, uma recetora e outra emissora. Neste caso, teve-se de ter em conta esse aspeto nas medições, de modo a ter resultados coerentes.

Esse aspeto diz respeito ao fato de que as antenas, tanto a recetora como a emissora, têm de estar sempre com o mesmo sentido, ver Figura 4.32, de modo a que o sinal registado seja positivo e não apareça um sinal negativo. O sinal que nos aparece nos registos vem sempre com o sinal trocado quando as antenas se encontram posicionadas com sentidos diferentes.

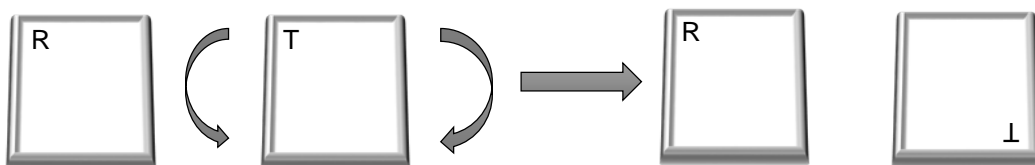


Figura 4.32. Exemplo da troca de sentido de uma das antenas



Visualiza-se melhor através da figura seguinte a inversão do sinal obtido no caso da troca de sentido.

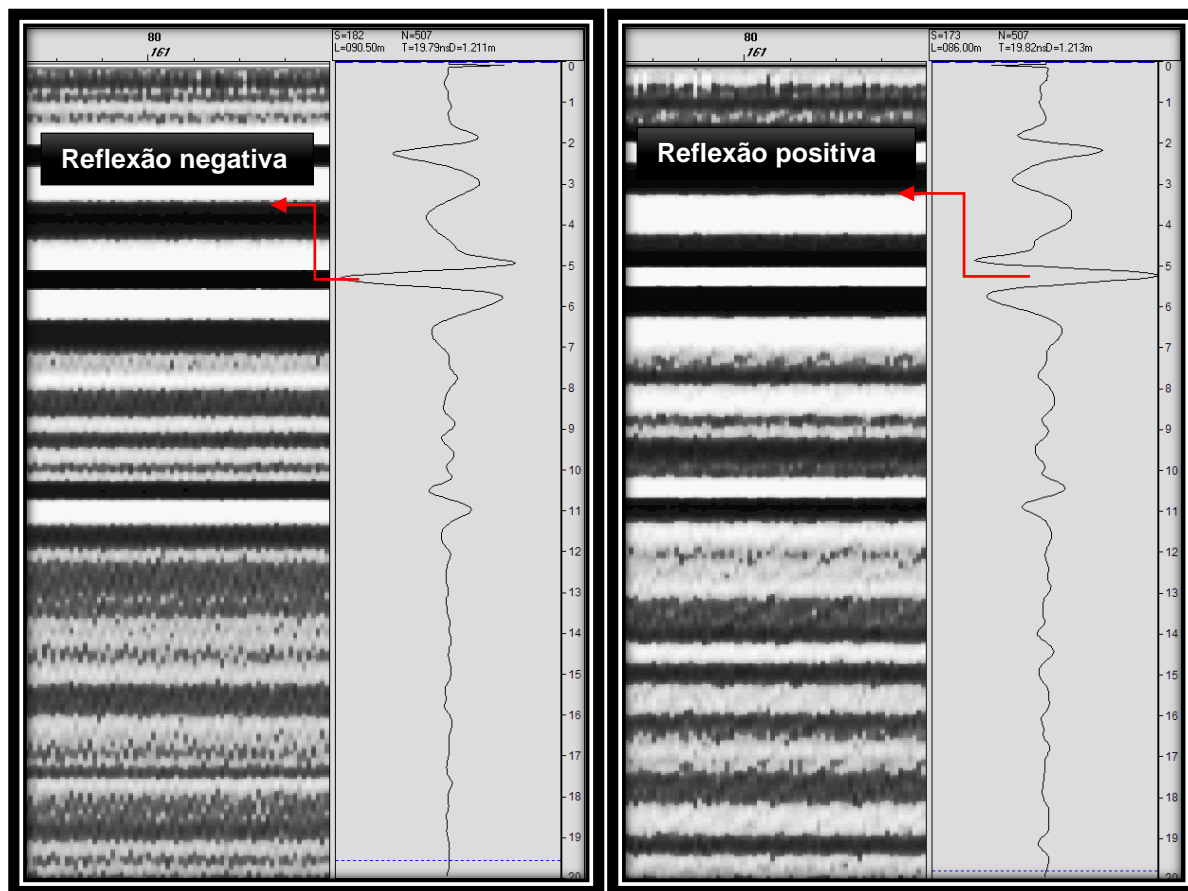


Figura 4.33. Exemplo da troca de sinal no registo, quando se troca o sentido a uma das antenas

#### 4.7.3 SISTEMA IDS

Relativamente ao sistema da IDS, a dificuldade maior que existe na determinação das constantes dielétricas situa-se na localização do zero (reflexão da superfície).

A determinação desta localização já foi falada anteriormente, no entanto, quando se trata dos ensaios “*in situ*” existe sempre a possibilidade de localizar a superfície (topo da travessa) “automaticamente”. Esta localização “automática” é realizada antes da colocação dos filtros de processamento no software de interpretação, através da escolha da superfície como sendo o segundo pico negativo, como se pode observar na figura seguinte.



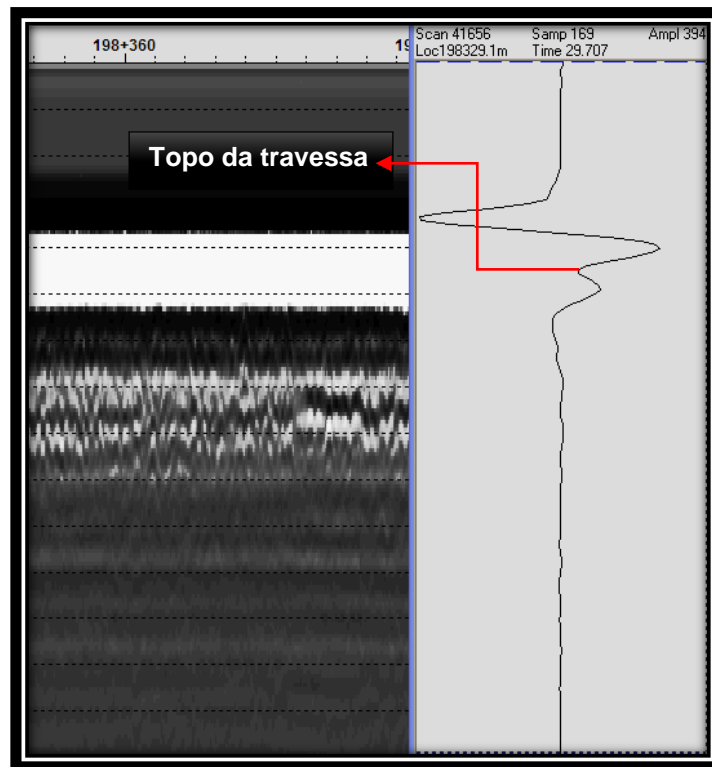


Figura 4.34. Determinação automática da localização da superfície (topo da travessa)

Para além dessa grande dificuldade, existe algo que é inerente à própria antena e que no caso da IDS pode complicar os cálculos. Trata-se do impulso do sinal, o qual depende da antena a utilizar, que no caso da antena da IDS com frequência de 400 MHz é de cerca de 6ns, pelo que torna-se difícil conseguir detetar camadas superficiais com uma espessura reduzida.

Um outro aspeto fulcral na utilização deste tipo de equipamento e que tem de se ter sempre em conta diz respeito à utilização do programa de interpretação Railwaydoctor (programa utilizado pelo autor para a visualização dos registos). Algo com que o autor se deparou, foi que, quando se passa qualquer ficheiro da IDS para o programa este acaba sempre por inverter o sinal, acontecendo apenas com este sistema.

#### 4.8 CUIDADOS NA INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS “*IN SITU*”

Tendo em conta tudo o que foi dito anteriormente, relativamente ao cálculo das constantes dielétricas, é necessário que se tenha em conta que em campo esse mesmo cálculo, estando relacionado com a espessura das camadas, tornar-se-á muito mais difícil. Assim sendo, numa tentativa de avaliar o erro no cálculo das constantes “*in situ*” e sabendo que a espessura medida no local pode não ser a mais acertada, apresenta-se a seguir as conclusões a que se chegou.

Foram feitos três estudos, tendo como base os ensaios em laboratório feitos com a antena da IDS. O primeiro estudo foi feito para um balastro granítico limpo e seco, um outro estudo é relativo a um balastro com índice de contaminação 15, e com um teor em água de 8% e por último foi estudado um balastro com índice de contaminação 55 e com teor em água de 8%.

Para cada um desses balastros referidos anteriormente, foi associada uma constante dielétrica obtida em laboratório. No caso do balastro limpo foi de 4, para um balastro de índice 15 com teor em água de 8%, foi de 6 e para uma balastro de índice 55 com teor em água de 8%, foi de 8. Fizeram-se variar estas constantes de meio em meio valor, quer seja acima ou abaixo da definida inicialmente.

Como exemplo, pode-se observar na figura seguinte, relativamente ao balastro limpo e seco, a variação que existe da espessura quando se faz variar a constante, tendo como espessura inicial aproximadamente quarenta centímetros.

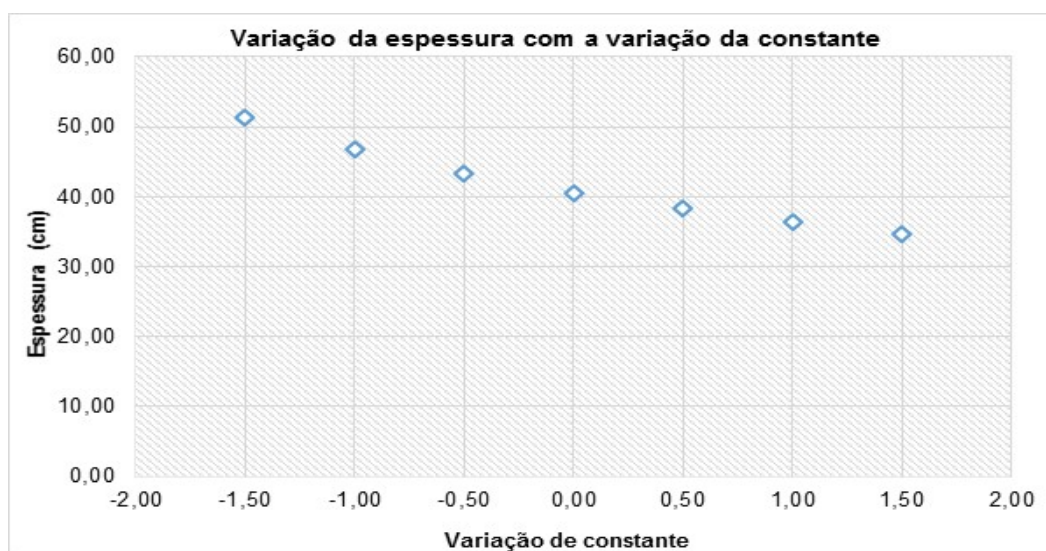


Figura 4.35. Gráfico com a variação da espessura com a variação da constante

Relativamente aos três tipos de balastro, mencionados anteriormente, é apresentado de seguida um gráfico, onde se tem a variação da espessura com a variação da constante. Essa variação de espessura é feita, tendo em conta a espessura inicial de cada balastro.

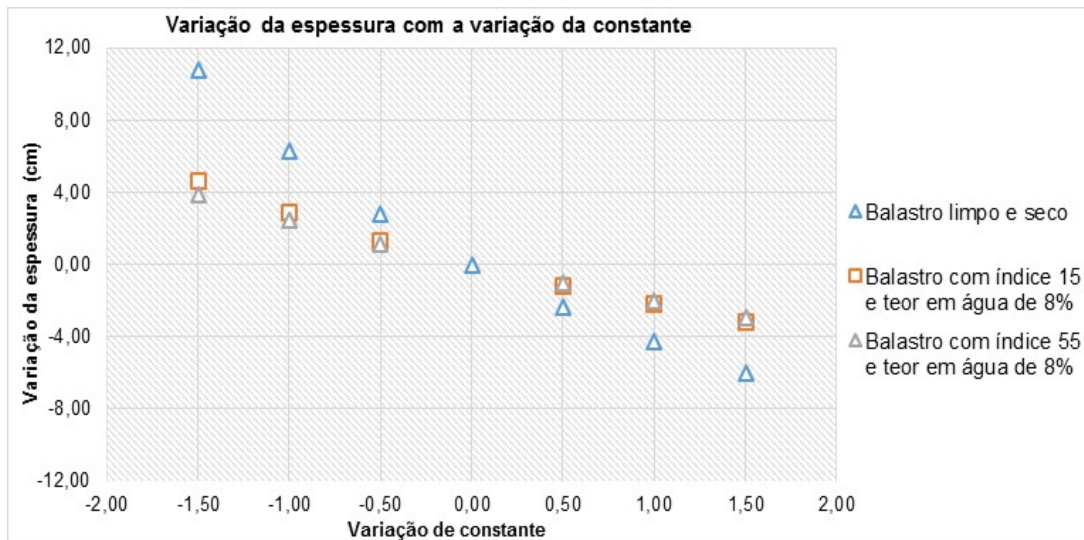


Figura 4.36. Gráfico com a diferença/variação da espessura para cada tipo de balastro, variando a constante

Por exemplo, se diminuir 1,5 na constante de um balastro limpo e seco, a espessura vai aumentar cerca de dez centímetros.

Chegou-se à conclusão como esperado que, quando se diminui a constante a espessura vai aumentar.

Pode-se observar que a espessura varia mais rapidamente, quando se diminui a constante.

Outra conclusão a que se chegou, indica que no caso de um balastro granítico limpo e seco a espessura tem uma maior variação, quando se varia a constante. No caso de um balastro contaminado, a variação de espessura é menor para a mesma variação na constante.

Por fim, observa-se que, a variação que vai haver na espessura de um balastro contaminado para outro, é insignificante quando se faz variar a constante. O mesmo não acontece quando se compara essa variação, entre um balastro contaminado e um balastro limpo.



## 5 REALIZAÇÃO DE ENSAIOS “*IN SITU*”

### 5.1 ENQUADRAMENTO DOS ENSAIOS

Os ensaios “*in situ*” foram realizados em três secções de linhas da rede ferroviária nacional com condições diferentes de circulação e de contaminação do balastro.

Assim, os primeiros ensaios foram realizados numa linha de mercadorias com balastro muito contaminado, na altura da realização de um desguarnecimento da zona em estudo. Refere-se que na véspera do desguarnecimento foram realizadas medições com o equipamento EM 120.

Os outros dois casos de estudo aqui apresentados foram realizados numa linha de mercadorias renovada recentemente, com balastro novo, e numa linha de circulação mista, com balastro pouco contaminado, respetivamente. Estes últimos casos de estudo foram realizados através da análise de ensaios medidos com o Radar de Prospeção em campanhas regulares levadas a cabo pela REFER. Para completar essa informação foram realizados poços na via para validar a espessura das camadas. Como os ensaios com o Radar de Prospeção e os poços não foram feitos ao mesmo tempo, o teor em água do material recolhido na altura da realização dos poços não é representativo para interpretação dos ensaios com o Radar de Prospeção.

Os três casos de estudo tiveram como objetivo a validação dos resultados obtidos em laboratório e apresentam-se de seguida.

### 5.2 LINHA COM BALASTRO MUITO CONTAMINADO – LINHA DE MERCADORIAS

O Primeiro caso de estudo foi realizado numa linha de mercadorias, com balastro bastante contaminado, apresentando com sinais visível de contaminação a superfície. A secção estudada encontra-se junto a uma passagem de nível tendo o balastro mais contaminação próximo desta e menos a medida que se afasta da passagem de nível. O material analisado neste estudo foi recolhido durante um trabalho de desguarnecimento, realizado em período noturno, altura em que foi medida também a espessura da camada. Foram recolhidas amostras de balastro com dois níveis de contaminação, um bastante contaminado e outro menos contaminado. As amostras foram ensaiadas em laboratório de maneira a que se conseguisse obter o índice de contaminação de cada um através da fórmula de Indraratna, referida anteriormente.

Os ensaios efetuados em laboratório nos dois tipos de balastro, foram a análise granulométrica e a determinação da massa volúmica. A granulometria foi determinada através da norma (NP EN 13450, 2003), para os dois tipos de balastro. As curvas granulométricas são apresentadas na Figura 5.1. Curva

granulométrica do balastro contaminado, para o balastro contaminado e na Figura 5.2 para o balastro muito contaminado.

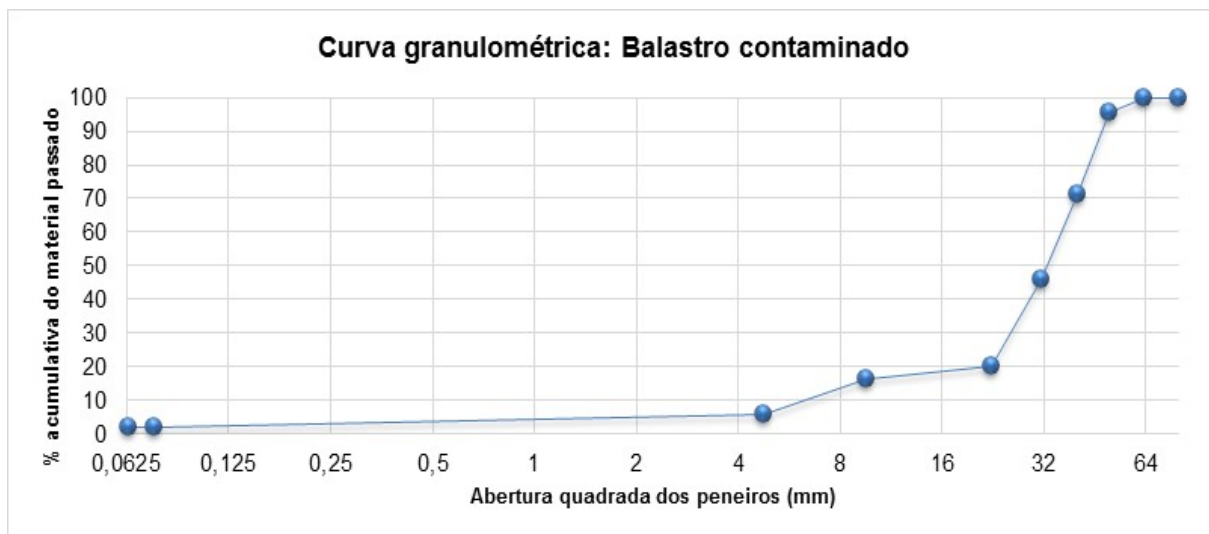


Figura 5.1. Curva granulométrica do balastro contaminado

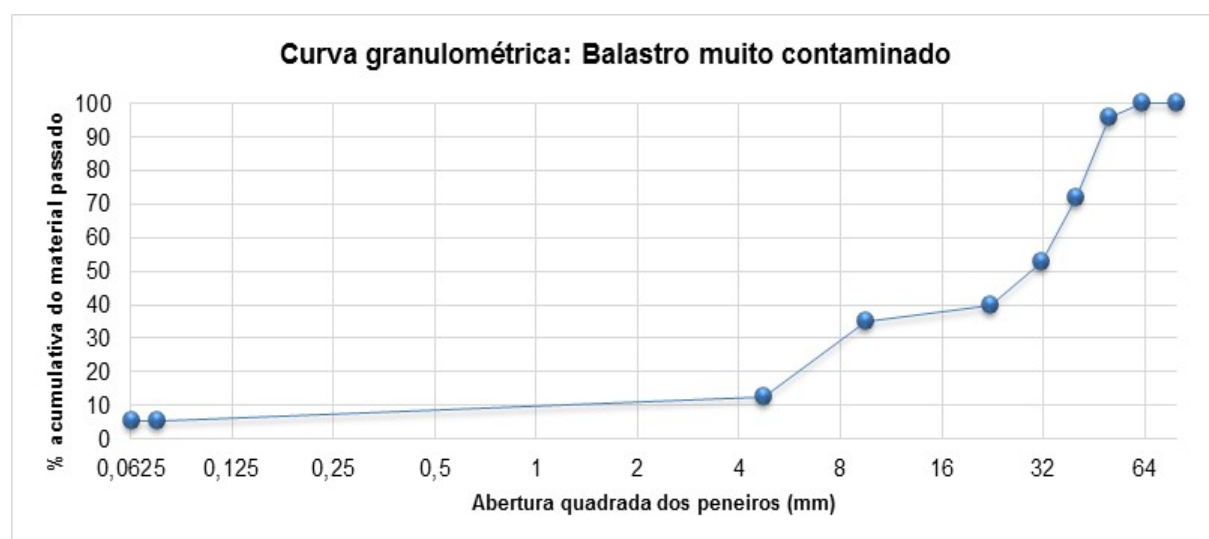


Figura 5.2. Curva granulométrica do balastro muito contaminado

Consegue-se observar que no caso do balastro contaminado existe cerca de vinte por cento que passa no peneiro 22,4mm, no entanto, no caso do balastro muito contaminado para esse mesmo peneiro, existe cerca de quarenta por cento, evidenciando o nível de contaminação desse balastro. Apresentam-se na figura seguinte as duas curvas granulométricas, relativas aos dois tipos de balastro, com o fuso proposto por Fortunato, em 2005, para diversos balastros com níveis diferentes de contaminação.

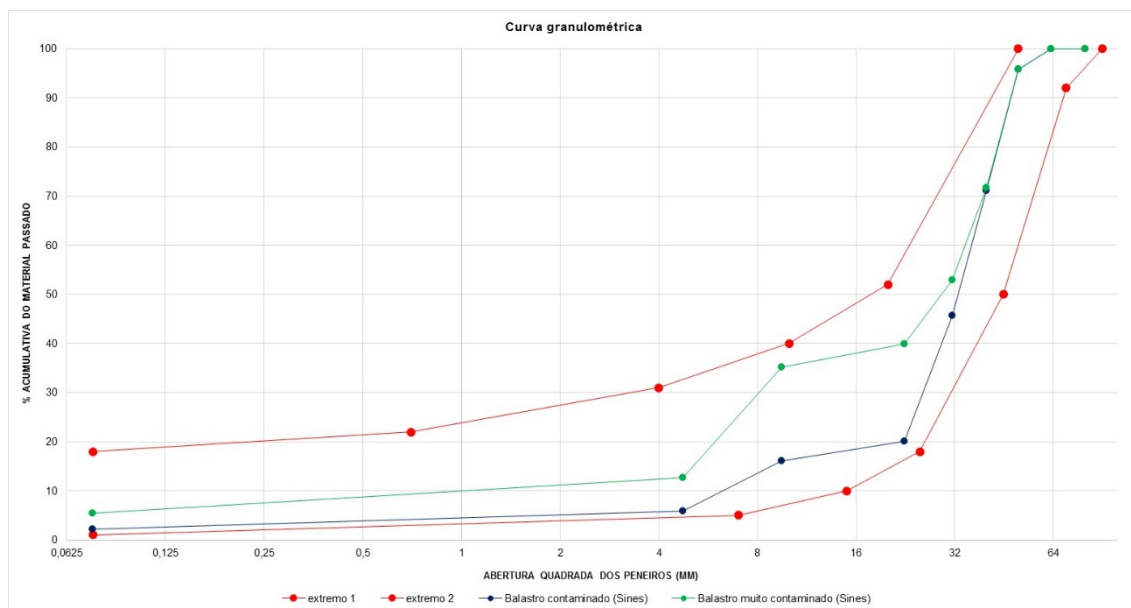


Figura 5.3. Curvas granulométricas dos dois balastros, com o fuso proposto por Fortunato, em 2005

Depois de ser feita a granulometria, separou-se cada uma das amostras em quatro parcelas, abaixo dos 9,5mm, entre 9,5mm e 22,4mm, entre 22,4mm e 31,5mm e entre 31,5mm e 63mm, para proceder-se à determinação da massa volúmica de cada uma destas parcelas. Foram seguidas diferentes normas no cálculo da massa volúmica, utilizando para a parcela abaixo dos 9,5mm a norma (NP EN 581-1969 , 1969), para as parcelas entre 9,5mm e 31,5mm foi seguido o procedimento LERO PE-01 baseado na norma (NP EN 1936, 2001) e para a parcela entre 31,5mm e 63mm seguiu-se a norma (NP EN 1097 - 6, 2003).

Apresentam-se de seguida os resultados das massas volúmicas para cada um dos dois tipos de balastro e para cada parcela, bem como, a ponderação relativamente ao material acima de 9,5mm, para cada tipo de balastro, tendo em conta a massa retida e a massa total da amostra.

Quadro 5.1. Valores relativos à massa volúmica das partículas secas, para um balastro contaminado e um balastro muito contaminado

Massa volúmica das partículas secas				
Fração (mm)	Balastro contaminado		Balastro muito contaminado	
	Medida	Ponderada	Medida	Ponderada
31,5 - 63,0	2,66	2,65	2,64	2,64
22,4 - 31,5	2,66		2,64	
9,5 - 22,4	2,62		2,64	
<9,5	2,61	2,61	2,64	2,64

Com as massas volúmicas que se obtiveram (acima de 9,5mm e abaixo de 9,5mm), bem como, com as massas correspondentes, que se determinaram através da granulometria, conseguiu-se chegar a um valor para o nível de contaminação através da fórmula de Indraratna e de Selig referidas anteriormente.

Quadro 5.2. Valores dos índices de contaminação para os dois tipos de balastro

	Balastro contaminado	Balastro muito contaminado
<b>Índice de contaminação (Indraratna)</b>	19	54
<b>Índice de contaminação (Selig)</b>	8	18

Como se pode observar os índices de contaminação do balastro obtidos pelo método do Indraratna e pelo do Selig não se encontram na mesma categoria, como já apresentado na tabela anterior, devido ao método de contabilização dos finos. Esta diferença existe, devido ao fato de que tem-se uma certa quantidade de material entre os peneiros 4,75mm e 9,5mm, que não é contabilizado na fórmula de Selig, como material de contaminação. Ou seja, na fórmula de Indraratna acaba por haver uma maior percentagem de material de contaminação. Consegue-se ver melhor essa diferença no balastro muito contaminado, onde tem-se cerca de vinte e cinco por cento de material entre os peneiros 4,75mm e 9,5mm.

Determinados os índices de contaminação, foi-se tentar descobrir o que realmente se passava na via, no local onde se retiraram as amostras, através de registos feitos com o EM120 em diversas campanhas, uma delas na véspera da recolha do material. Foram recolhidos e tratados dados, essencialmente do GPR, mas também do nivelamento longitudinal. Na figura seguinte consegue-se ver melhor a evolução que existe ao longo das campanhas para o desvio padrão, relativamente ao índice de qualidade, para o nivelamento longitudinal.

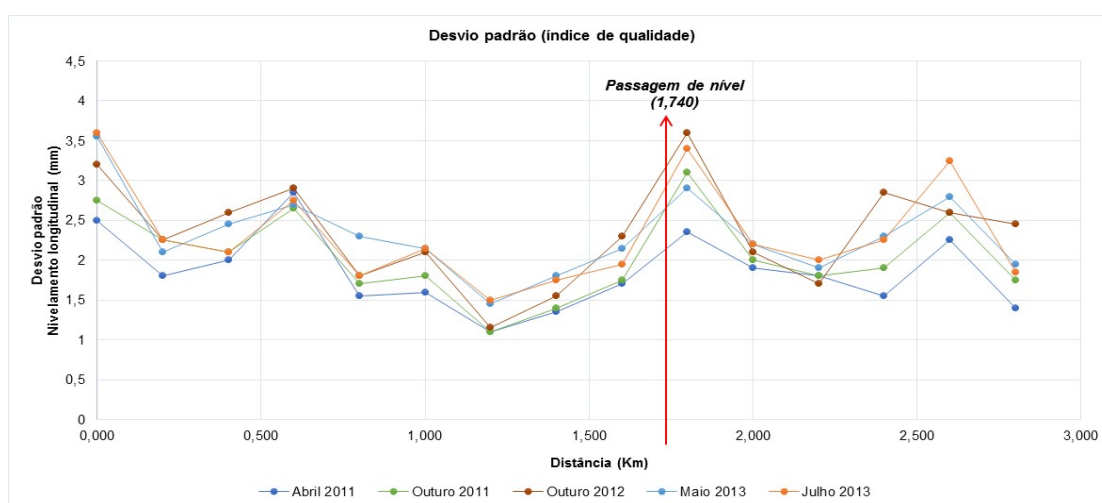


Figura 5.4. Evolução do desvio padrão nas cinco campanhas para o índice de qualidade



Através do gráfico anterior, consegue-se ver a evolução do desvio padrão na zona da passagem de nível ao quilómetro 1, aparecendo um pico nessa zona, sendo um indicador de que algo não está bem. Para que se consiga ver melhor a evolução que aí ocorre, é apresentado de seguida um gráfico que engloba a passagem de nível com as duas últimas campanhas, relativamente ao desvio padrão para o índice de qualidade.

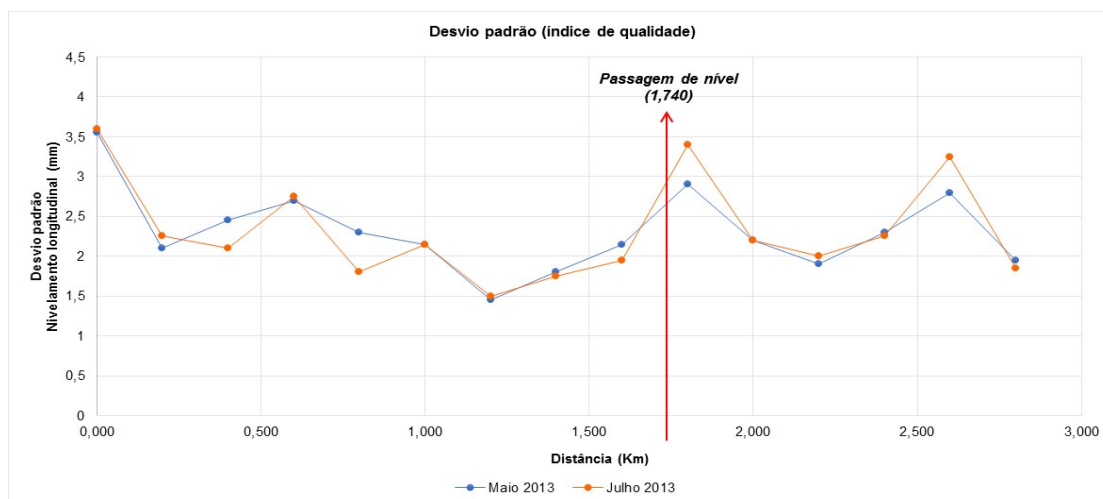


Figura 5.5. Evolução do desvio padrão para o índice de qualidade, relativamente às duas últimas campanhas

Consegue-se ver no gráfico anterior que mesmo depois da intervenção que houve em Maio, após a passagem da EM 120, o desvio padrão acabou por aumentar. No entanto, esse aumento ocorre quando se faz a avaliação dessa linha em termos de desvio padrão para o nivelamento longitudinal de 200 em 200 metros. Quando se avalia esse mesmo troço de 25 em 25 centímetros no Km 1 relativamente ao nivelamento longitudinal esquerdo e direito, verifica-se que existe uma evolução positiva, como se pode observar nas seguintes figuras que mostram as duas últimas campanhas.

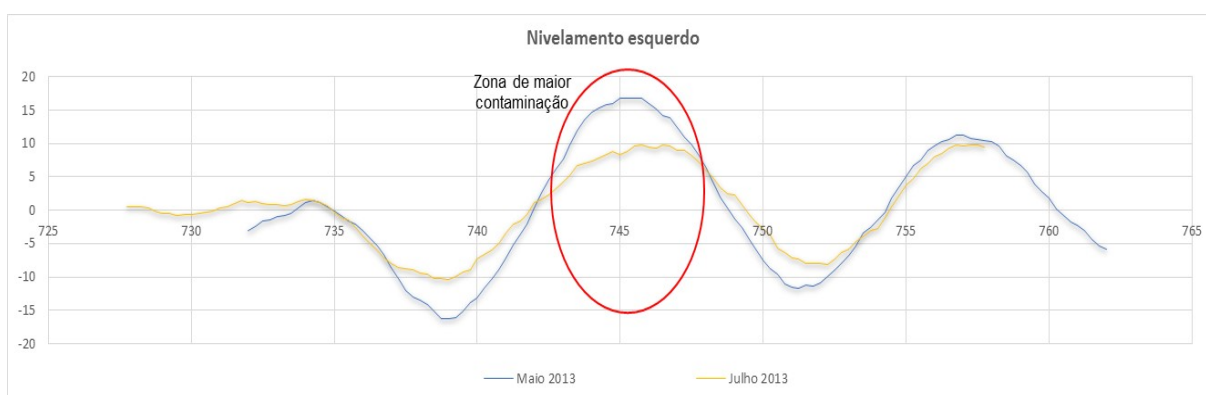


Figura 5.6. Evolução do nivelamento longitudinal esquerdo para as duas últimas campanhas do troço em estudo

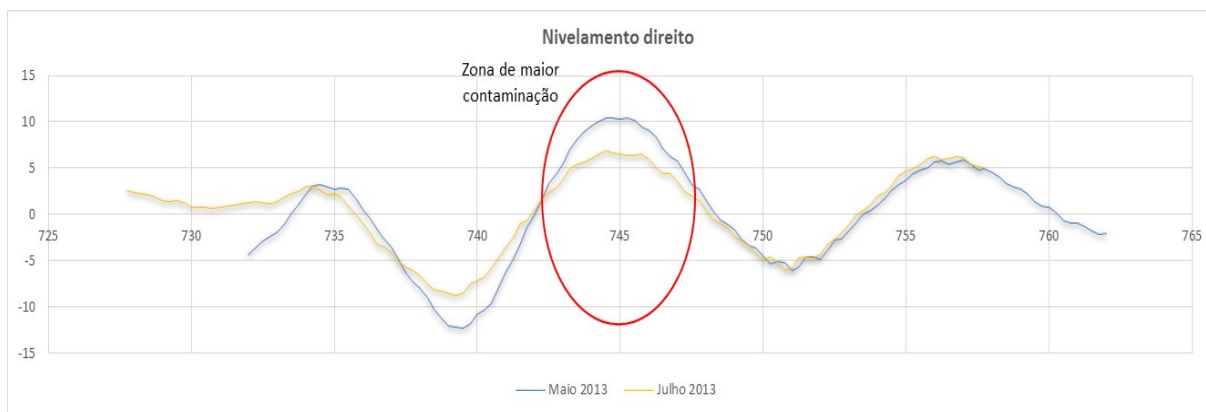


Figura 5.7. Evolução do nivelamento longitudinal direito para as duas últimas campanhas do troço em estudo

Através dos ensaios efetuados na linha, junto à passagem de nível, foram recolhidos registos do Radar de prospeção em três campanhas diferentes de maneira que se conseguisse observar a evolução da possível contaminação nessa zona. Foram assim calculadas as constantes dielétricas para os diferentes pontos junto à passagem de nível para as três campanhas e calculado posteriormente o desvio padrão para cada um desses pontos de modo a que se pudesse observar em mais pormenor qual o local exato que está a sofrer maior contaminação.

O cálculo das constantes dielétricas foi feito como indicado anteriormente com a antena da IDS suspensa para os ensaios laboratoriais. Com a exceção de que o valor da acoplagem é retirado em nano segundos antes da colocação dos filtros, sendo o cálculo feito de seguida com filtros. Pode-se observar na Figura 5.8 os registos feitos na campanha de Maio de 2013 sem filtros e com filtros. Este cálculo é o mesmo utilizado para os outros ensaios “*in situ*”.

Foi adotada a espessura de trinta e cinco centímetros, medida no local, para todos os pontos a analisar podendo haver algum erro incutido no cálculo das constantes dielétricas. Os resultados estão apresentados no Quadro 5.3. e na Figura 5.9. Apresentando também, os registos feitos pelo georadar para as três campanhas estudadas na Figura 5.10.

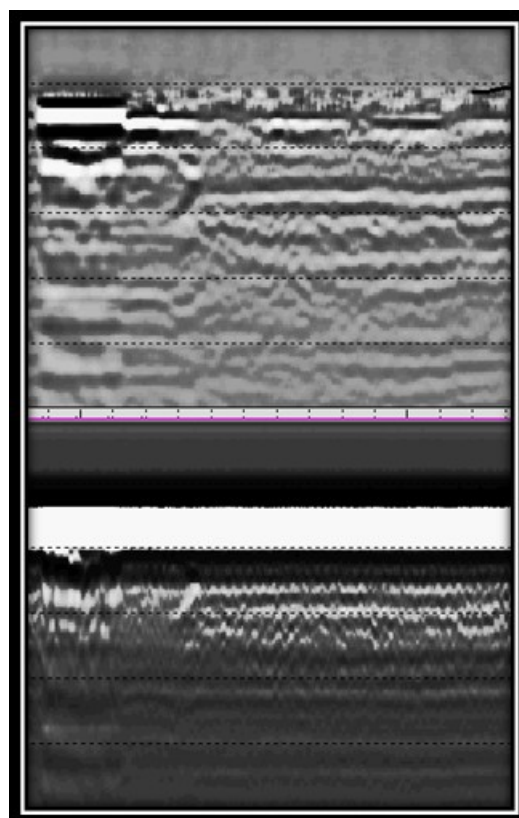


Figura 5.8. Registo feitos pelo georadar na campanha de Maio de 2013: com filtros, em cima e sem filtros, em baixo

Quadro 5.3. Constantes dielétricas e desvio padrão para os diferentes pontos

Constantes dielétricas				
Km (1)	Outubro 2011	Abril 2012	Maio 2013	Desvio padrão
743,00	11,78	12,84	13,39	0,82
743,50	10,28	11,27	12,85	1,30
744,00	10,28	12,30	13,39	1,58
744,50	9,34	12,30	12,85	1,89
745,00	7,59	11,27	12,85	2,70
747,00	8,01	8,01	10,78	1,60
749,00	6,78	7,18	6,79	0,23
750,00	6,02	5,30	6,03	0,42
755,00	6,39	5,66	5,67	0,42

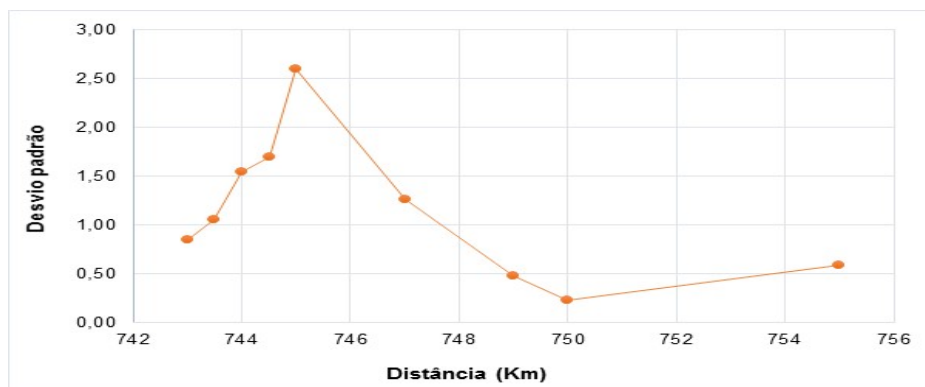


Figura 5.9. Evolução do desvio padrão da constante dielétrica para os diferentes pontos

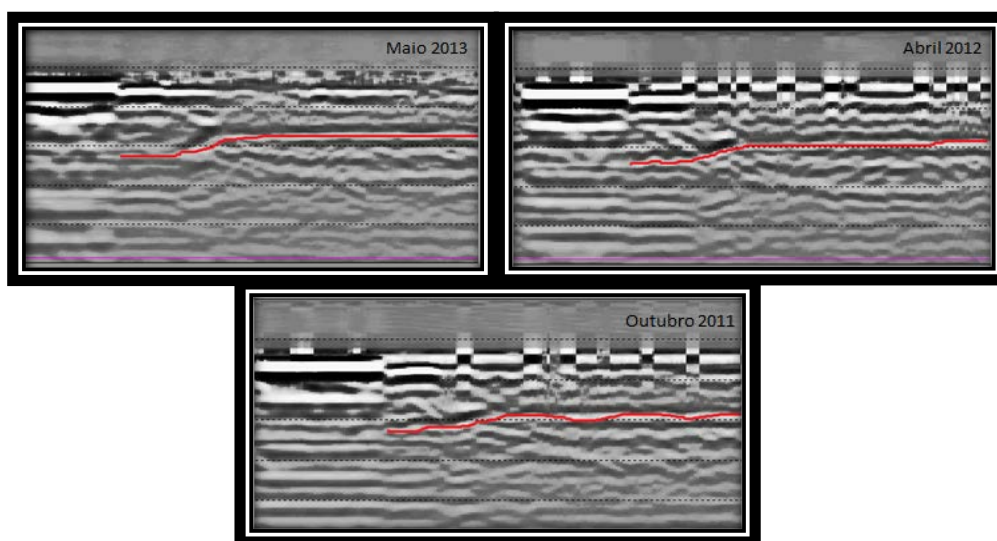


Figura 5.10. Registos do georadar para as três campanhas estudadas

Quadro 5.4. Constantes dielétricas e desvio padrão para os diferentes pontos

<b>Km (1)</b>	<b>Variação (%)</b>		<b>Variação (%)</b>		<b>Variação (%)</b>	
	Outubro 2011	Abril 2012	Abril 2012	Maio 2013	Outubro 2011	Maio 2013
<b>743,00</b>	8,98		4,35		13,33	
<b>743,50</b>	9,60		14,04		23,63	
<b>744,00</b>	19,66		8,88		28,54	
<b>744,50</b>	31,76		4,44		36,20	
<b>745,00</b>	48,50		14,04		62,54	
<b>747,00</b>	0,00		34,62		34,62	
<b>749,00</b>	5,87		-5,39		0,48	
<b>750,00</b>	-11,91		13,72		1,81	
<b>755,00</b>	-11,57		0,18		-11,39	

Através da tabela anterior, pode-se dizer que entre os 744 m e os 747 m, existe um maior aumento da contaminação. No entanto, essas diferenças acabam por ser influenciadas pelos erros associadas na determinação das espessuras, como foi referido anteriormente, ainda por mais sendo um balastro bastante contaminado.

Pode-se verificar que as constantes têm valores elevados mesmo sendo um balastro granítico muito contaminado (índice 54 e índice 19), devendo-se sobretudo à presença de balastro calcário na sua constituição.

Tendo em conta este aspeto, analisou-se a constante dielétrica do balastro calcário segundo o estudo feito por Fortunato em 2005, com o objetivo de avaliar a diferença existente nas constantes dielétricas do balastro calcário contaminado, segundo Selig, e o balastro granítico contaminado, segundo Indraratna.

Nesse estudo, foi analisado um balastro calcário seco e molhado para diferentes índices de contaminação segundo Selig, utilizando a antena de 900 MHz. É apresentado na figura seguinte o gráfico representativo desse estudo.

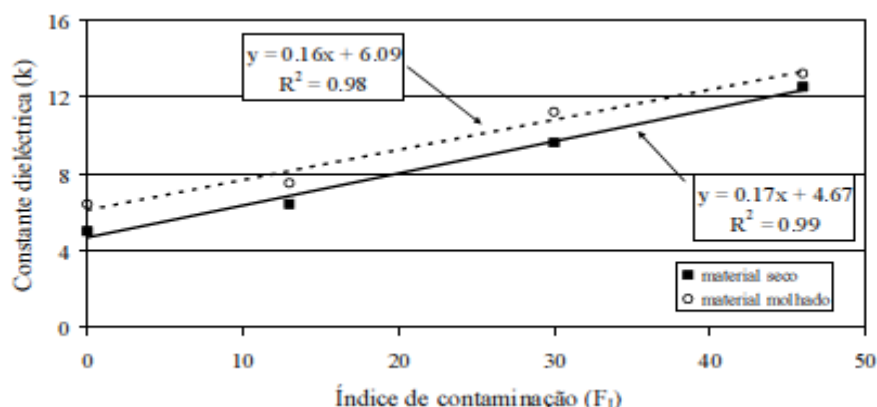


Figura 5.11. Estudo feito para um balastro calcário, com a antena de 900 MHz, para diferentes níveis de contaminação, através de Selig (Fortunato, 2005)

Para se conseguir analisar as constantes obtidas para os diferentes pontos na nossa linha, teve-se de avaliar a diferença entre as constantes de calcário observadas no gráfico anterior para os vários níveis de contaminação, segundo Selig, comparando-as com as constantes obtidas para um balastro granítico para vários níveis de contaminação, segundo Indraratna, considerando sempre a antena de 900 MHz.

Foi necessário recorrer aos casos de estudo do autor, para fazer a transformação dos índices de Indraratna, para os índices de Selig.

Para isso, foi necessário saber a percentagem de material que passa no peneiro 4,75mm e no peneiro 0,075mm para os diferentes índices, obtendo assim, os seguintes resultados.

Quadro 5.5. Transformação do índice de Indraratna, no índice de Selig

(Selig)	Transformação	(Indraratna)	Percentagens (%)	
			<4,75mm	<0,075mm
<b>7,94</b>	-	6	5,41	2,53
<b>17,77</b>	-	15	12,18	5,59
<b>34,92</b>	-	35	23,99	10,93
<b>49,34</b>	-	55	33,92	15,42

Posteriormente, analisou-se a diferença que existe entre a constante do calcário e a do granito, para os mesmos níveis de contaminação. Para isso, assumiu-se que o material seco no caso de estudo do balastro calcário equivale aos seis por cento de água do caso de estudo do balastro granítico.

Através da antena de 900 MHz, conseguiu-se ver a diferença entre constantes, para os diferentes materiais, apresentando-se de seguida os resultados.

Quadro 5.6. Valores de constante dielétrica para um balastro granítico com 6% de água, através da antena de 900 MHz e para os diferentes índices de contaminação do Indraratna

<b>Balastro granítico (Indraratna_6% de água)</b>				
<b>Antena: 900 MHz</b>	2,83	3,34	4,03	4,80
<b>Índices</b>	6	15	35	55

Quadro 5.7. Valores de constante dielétrica para um balastro calcário seco, através da antena de 900 MHz e para os diferentes índices de contaminação de Selig, segundo o estudo feito por Fortunato em 2005

<b>Balastro calcário (Selig_seco)</b>				
<b>Antena: 900 MHz</b>	6,02	7,69	10,61	13,06
<b>Índices</b>	7,94	17,77	34,92	49,34

Quadro 5.8. Diferença entre valores de constante dielétrica de um balastro calcário seco e um balastro granítico com 6% de água, apresentados nas tabelas anteriores

					<b>Média:</b>
<b>Diferenças:</b>	2,13	2,30	2,63	2,72	2,45

A diferença que existe entre a constante de um balastro calcário contaminado e de um balastro granítico contaminado é de 2,45 vezes, as constantes que se obteve estão sempre neste intervalo

Mesmo sabendo, a diferença que pode existir entre as constantes de um balastro granítico contaminado e um balastro calcário contaminado, seria necessário mais ensaios. Esses ensaios, serviriam para determinar a percentagem de balastro calcário e de balastro granítico nas amostras.

Seria necessário também mais ensaios, visto que os valores de constante obtidos de uma campanha para a outra nos vários pontos, são incoerentes, não seguindo a mesma evolução.

### 5.3 LINHA RENOVADA RECENTEMENTE – LINHA DE MERCADORIAS

Outros ensaios “*in situ*” foram feitos numa linha renovada recentemente, com balastro novo, mas também com alguma contaminação nas camadas inferiores, correspondendo a um balastro mais antigo, contendo vestígios de balastro calcário.

Dos poços realizados no local determinou-se a constante do balastro novo/limpo (granítico) para três campanhas distintas. Deste modo, tentou-se tirar algumas conclusões através da comparação com a constante dielétrica relativa para um balastro limpo (granítico) obtida em laboratório, mas também sobre a evolução das constantes ao longo das campanhas.

Foi tida em consideração o teor em água do balastro recolhido, recorrendo-se à norma utilizada anteriormente para a determinação do mesmo. Obtiveram-se valores de 0,1% e de 0,2% relativamente

às duas amostras. Como se pode observar, o teor em água é bastante reduzido, acabando por não influenciar a constante dielétrica.

Assim sendo, de modo a ser feita a validação dos resultados, teve-se de se ter em conta a constante relativa de um balastro granítico limpo e seco obtida em laboratório, para a antena da IDS quando esta se encontra suspensa.

Apresenta-se de seguida os resultados obtidos para os três poços analisados, para as diferentes campanhas.

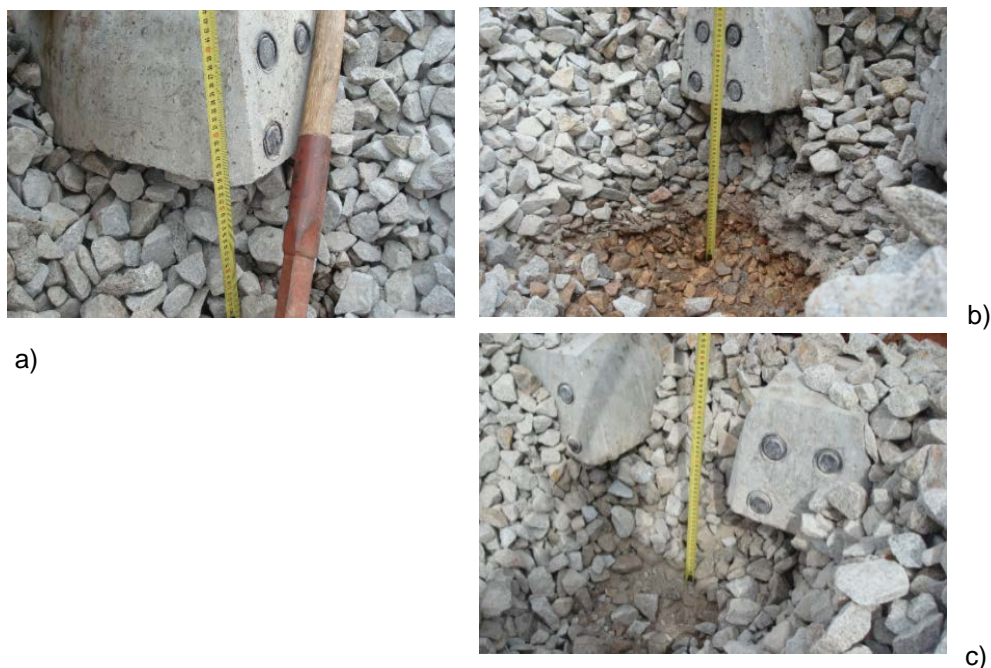


Figura 5.12. Visualização da espessura relativa aos três poços analisados; a) poço 1 (km 0 + 890); b) poço 2 (1 + 000); c) poço 3 (2 + 954)

Os resultados relativamente ao cálculo da constante dielétrica para as três campanhas, são apresentados de seguida, sendo estes feitos da mesma maneira que para os ensaios “*in situ*” executados anteriormente.



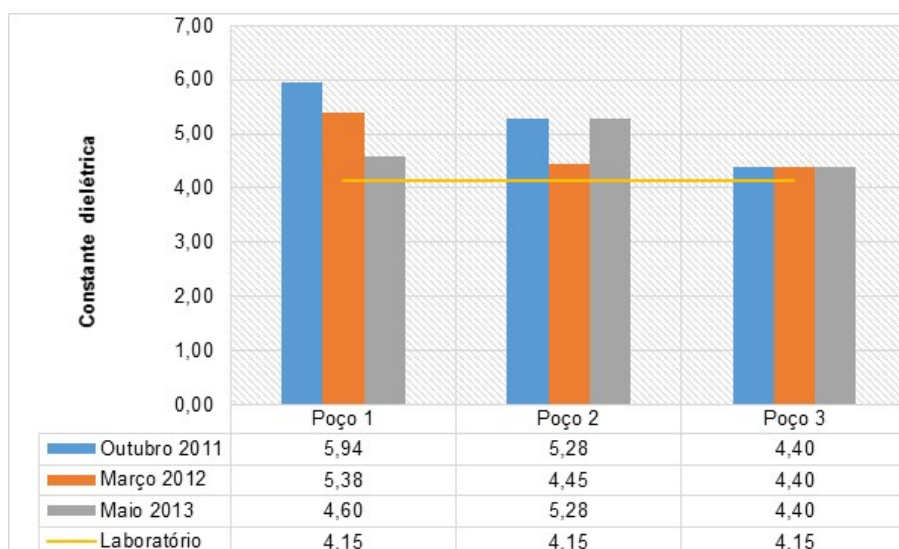


Figura 5.13. Valores de constante dielétrica relativo aos três poços estudados, para as três campanhas e a constante dielétrica obtida em laboratório para a antena da IDS, suspensa

Como se pode observar o valor obtido para as constantes dielétricas nos diferentes poços, tende a aproximar-se do resultado em laboratório. Tem-se de ter sempre em conta que, como foi dito anteriormente, pode existir erros na medição da espessura, fazendo variar a constante.

#### 5.4 LINHA EXISTENTE COM BALASTRO CONTAMINADO – LINHA MISTA

Para além dos ensaios realizados “*in situ*” apresentados anteriormente, foram também executados alguns ensaios numa linha de circulação mista, com balastro contaminado.

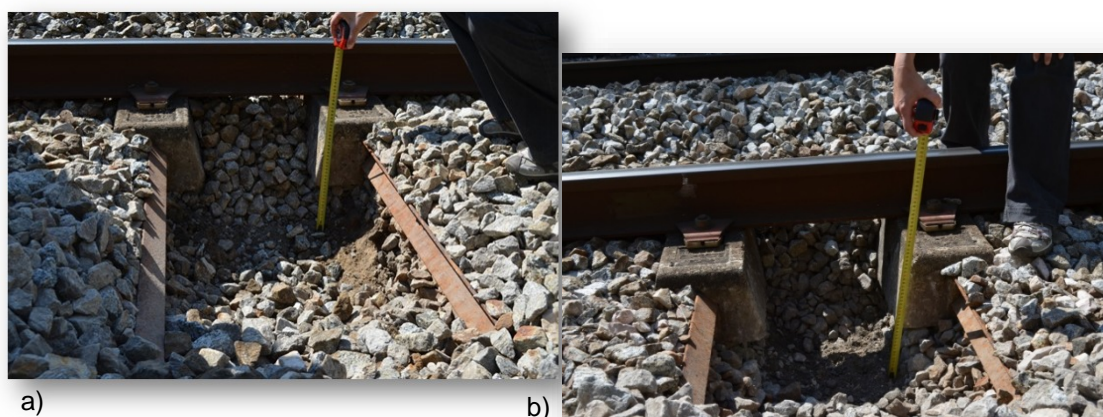


Figura 5.14. Visualização dos poços executados. a) Poço 1, b) Poço 2



Quadro 5.9. Evolução das constantes dielétricas nos dois poços, ao longo das campanhas

	Constantes dielétricas			
Poços	Setembro 2011	Janeiro 2012	Abril 2012	Abril 2013
1	4,45	5,39	5,40	4,45
2	6,52	8,10	7,45	6,82

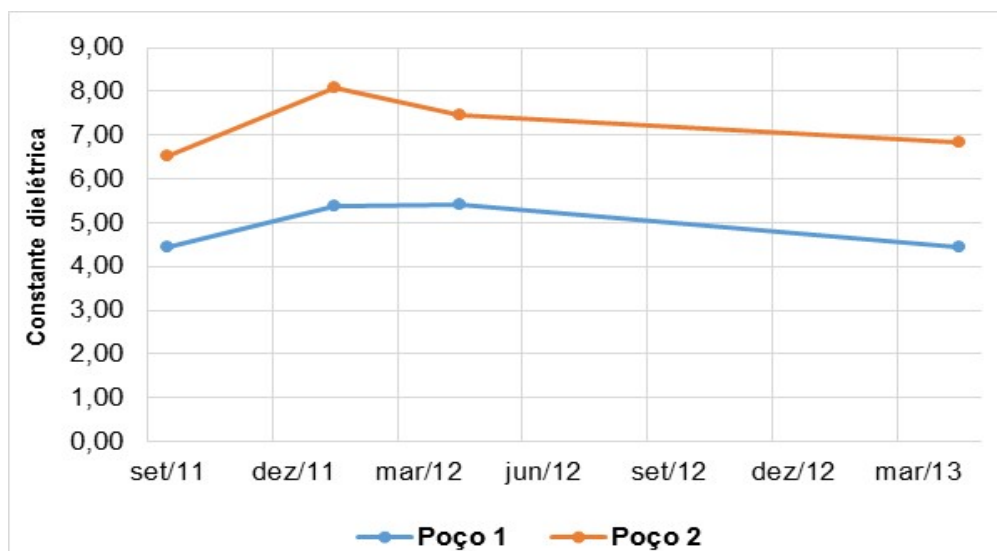


Figura 5.15. Evolução das constantes dielétricas, relativas aos dois poços

Consegue-se observar que existe um aumento na constante de setembro de 2011 para Janeiro de 2012, sendo esse aumento no poço 2, pode ser um indicador de que este poço encontra-se mais contaminado.

Segundo os resultados que se obtiveram em laboratório, verifica-se que relativamente ao poço 1 as constantes encontram-se associadas ao índice 6 de contaminação, ocorrendo apenas a variação do teor em água. Enquanto o poço 2, associa-se ao índice 35, ou um índice inferior mas com mais presença de água.

Mais se refere que os valores obtidos podem ter um aumento da constante dado que se trata de balastro granítico com vestígios de balastro calcário, como no caso anterior.

Esta associação é tida em conta, devido aos valores obtidos em laboratório, apresentados na Quadro 4.8.

## 5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos ensaios realizados em campo, pode-se considerar que os valores das constantes dielétricas obtidos estão dentro da gama de variação dos valores obtidos em laboratório. Mais se refere que é difícil associar uma constante dielétrica ao nível de contaminação sem saber o valor do teor em água na altura da realização dos ensaios com o equipamento Radar de Prospeção.

Salienta-se uma dificuldade acrescida quando se trata de linhas antigas em funcionamento, dado que o balastro analisado apresenta também agregado calcário, não só granítico. Assim a presença do calcário pode aumentar a constante dielétrica medida.

Relativamente aos ensaios de geometria de via analisados em paralelo com os ensaios obtidos com o Radar de Prospeção, a variação destes numa campanha a outra ao longo dos anos analisados não permite ainda tirar as dúvidas relativas à variação com o teor em água.

Recomenda-se assim a realização de mais campanhas com o registo pormenorizado da ocorrência de precipitação nas zonas medidas, assim tornando-se possível identificar melhor a variação da constante medida com o teor em água.

## 6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Sabendo que o transporte ferroviário tende a ser um meio de transporte ambientalmente sustentável e económico na sociedade em que se vive atualmente, quer para o seu desenvolvimento, quer para a sua viabilidade, é necessário, a sua manutenção e reabilitação.

Na presente dissertação foi abordado o Radar de prospeção (GPR) como uma das técnicas mais recentes aplicadas na inspeção da ferrovia. O radar funciona através de ondas de rádio de curta duração, enviadas para a subestrutura através de uma antena emissora e recebidas através de uma antena recetora. Assim, deteta alterações em profundidade relacionadas com as diferentes características dielétricas dos diferentes materiais.

Com base na velocidade da onda e do tempo percorrido pela mesma, é possível determinar a espessura da camada ensaiada. Geralmente, para confirmar a espessura das camadas é necessário realizar poços e sondagens “*in situ*” ou de ter conhecimento do valor da constante dielétrica do material ensaiado.

Dada a dificuldade na realização de poços nos caminhos-de-ferro, esta segunda forma de calibrar os ensaios com o radar, nomeadamente através da constante dielétrica, é mais prática e viável. O valor da constante dielétrica pode ser avaliado em laboratório, em modelos físicos de camadas de balastro, que reproduzem as condições existentes na via. Nestas situações, a constante dielétrica é estimada em laboratório com base na velocidade da onda e no tempo percorrido, dado que se conhece a espessura da camada.

Neste estudo foram realizadas várias medições de constantes dielétricas em laboratório, em modelos físicos que reproduzem níveis de contaminação diferentes do balastro e com diferentes teores em água. Os ensaios foram realizados utilizando diversas antenas com frequências entre 400 MHz e 1800 MHz para avaliar a influência da frequência no valor da constante dielétrica e averiguar a adequabilidade da utilização das antenas a cada situação. Geralmente, as antenas com frequências baixas são mais recomendadas para medição de espessuras enquanto as de frequência alta por ter uma maior resolução, utilizam-se na determinação do nível de contaminação do balastro.

Conhecendo a espessura do meio em causa consegue-se calcular a respetiva constante dielétrica. Quando existe variação da constante dielétrica para o mesmo material, essa alteração pode ser devido à presença de água, ou à presença de finos (solo, balastro desagregado, material de contaminação), que se acumulará nos vazios existentes no balastro, ou ao efeito conjugado das duas. Quanto mais material de contaminação houver nos vazios, mais água ficará retida e maior será a constante dielétrica. Esta aumentará porque os vazios do balastro encontram-se preenchidos, assim a onda levará mais tempo a percorrer o meio. Também a presença de outro material, como é o caso do balastro das vias

férreas antigas, em que ainda se encontra balastro calcário, pode afetar o valor da constante dielétrica da camada.

Como foi referido anteriormente a água possui uma constante de oitenta, logo, a presença de água no meio fará aumentar significativamente a constante dielétrica.

Neste trabalho foram usadas várias antenas com diferentes frequências para três casos de estudo.

- ❖ Estudo do balastro limpo - Caso de estudo 1
- ❖ Estudo do solo – Caso de estudo 2
- ❖ Estudo do balastro contaminado – Caso de estudo 3

Para cada antena foi adotada uma janela de medição, sendo essa janela maior para antenas de menor frequência. No entanto, no caso de material com uma constante dielétrica maior, em que a onda demore mais tempo a percorrer o meio, é necessário aumentar essa janela para antenas de maior frequência, de maneira a que se consiga ver a reflexão da base do modelo físico, onde foi colocado alumínio para aumentar a reflexão e facilitar a realização dos ensaios dado que melhora a deteção dessa reflexão.

As principais conclusões para os diferentes casos de estudo, são as seguintes:

#### *Balastro limpo*

- No caso do balastro limpo e seco, a constante dielétrica aumenta com o aumento da frequência das antenas exceto para a antena de 400 MHz da IDS.
- Como espectável, a constante aumentou exponencialmente quando adicionada água ao balastro.
- Pode-se observar, por fim que, as antenas da IDS são as que dão resultados menos coerentes, fenómeno verificado também nos outros casos de estudo.

#### *Solo de fundação*

- No caso do solo verifica-se que a constante dielétrica aumenta com o aumento do teor em água, como espectável. Observou-se também o aumento da mesma com o aumento da frequência das antenas.

#### *Balastro contaminado*

- Neste último caso de estudo, verificou-se que quanto maior a contaminação do balastro e maior a percentagem de água, maior será a constante dielétrica.
- Constata-se também que existe um maior aumento da constante dielétrica, quando existe um aumento da contaminação, para um mesmo teor em água. Por outro lado ocorre um menor aumento da constante dielétrica quando aumentamos o teor em água, para o mesmo nível de contaminação
- Verificou-se por fim que, quando aumentamos o nível de contaminação, mantendo o teor em água, a constante pode duplicar, variando entre cinquenta e cem por cento. No caso de haver um aumento do teor em água, mantendo o nível de contaminação, a percentagem varia entre cinco e quarenta por cento.

Relativamente aos ensaios “*in situ*” é de salientar a dificuldade que existe na associação de uma constante dielétrica a um nível de contaminação, quando não se sabe o teor em água na altura da realização dos ensaios. Existe também uma certa dificuldade na determinação das constantes em linhas antigas, devido à existência de balastro calcário e devido a uma outra dificuldade, que reside na determinação da espessura das camadas de balastro.

Observa-se também que, seria necessário executar mais poços nas linhas, para se conseguir fazer um estudo mais aprofundado. Para cada campanha feita com o Radar de prospeção, torna-se necessário o registo pormenorizado da precipitação nessas zonas, para uma melhor identificação da variação que existe da constante, com o teor em água, como foi referido anteriormente.

Foi ainda proposta uma nova metodologia para a interpretação dos resultados feitos pela antena da IDS, com base no percurso da onda no ar.

## 6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como desenvolvimentos futuros é necessário comprovar os resultados obtidos em laboratório com ensaios em campo e realização de poços para análise da contaminação e do teor em água. Deveram ser realizados os poços na mesma altura da realização dos ensaios com o radar para melhor fiabilidade da análise.

Deverão ser realizados mais estudos para tentar distinguir entre a influência da contaminação e do teor em água, através da comparação de várias campanhas em diferentes alturas do ano com níveis de pluviosidade diferentes.

De forma a contribuir para uma gestão melhor das ações de manutenção da via é preciso integrar os resultados do Radar de prospeção com as medições da geometria da via realizadas com a EM 120.



## BIBLIOGRAFIA

Alemu, A. Y., 2011. Survey of Railway Ballast Selection and Aspects of Modelling Techniques. Master Degree Project.

blogspot, 2008. [www.corro4v072.blogspot.pt](http://www.corro4v072.blogspot.pt). [Online].

brasilescola, 2013. [www.brasilescola.com](http://www.brasilescola.com). [Online].

Council, N. R., 1994. Ground Penetrating Radar Surveys to Characterize Pavement Layer Thickness Variations at GPS Sites.

Cruz, P., Topezewski, L., Fernandes, F. & Lourenço, P., 2006. JPÉE - Jornadas portuguesas de Engenharia de Estruturas. Utilização do radar de prospeção geotécnica na localização das bainhas de pré-esforço nas pontes da barra e de lanheses.

eeg-geophysics, 2013. [www.eeg-geophysics.com](http://www.eeg-geophysics.com). [Online].

efisica, 2013. [www.efisica.if.usp.br](http://www.efisica.if.usp.br). [Online].

Feldman, F. & Nissen, D., 2002. *Alternative testing method for the measurement of ballast fouling: percentage voids contamination. In Proceedings of the conference on Railway Engineering*. Australia: Railway Technical Society of Australia.

Fernandes, F. M. & Lourenço, P. B., 2007. Aplicações do georadar na reabilitação e deteção de anomalias.

Fontul, S., 2004. Structural Evaluation of flexible pavements using non-destructive tests. Tese de doutoramento. Universidade de Coimbra.

Fontul, S., 2013. Slides das aulas da disciplina Infraestruturas ferroviárias e portuárias. Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNL.

Fontul, S., de Chiara, F., Fortunato, E. & Paixão, A., 2012. Non Destructive Tests for Evaluation of Railway Platforms – Application of Ground Penetrating Radar; 1st International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. Espanha.

Fontul, S. & Fortunato, E., 2010. Caracterização de inertes da Pedreira GMC para utilização em balastro ferroviário, LNEC.

Fortunato, E., 2005. Renovação de plataformas rodoviárias, Estudos relativos à capacidade de carga. Tese de doutoramento em Engenharia Civil. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia. Porto.

GSSI, 2006. SIR System - 20. User's Manual. Geophysical Survey Systems, Inc..

Hanninen, P. et al., 1992. Geophysical Research Methods. GROUND PENETRATING RADAR. Tammer-Paino.

Hugenschmidt, J., 2000. Railway track inspection using GPR. Journal of Applied Geophysics. Amsterdam, Netherlands.

Hyslip, J. P., Smith, S. S., Olhoeft, G. R. & Selig, E. T., 2003. Assessment of railway track substructure condition using ground penetrating radar.

Hyslip, J. P., Smith, S. S., Olhoeft, G. R. & Selig, E. T., 2003. Assessment of railway track substructure condition using ground penetrating radar. Chicago.

Indraratna, B., Su, L.-j. & Rujikiatkamjorn, C., 2011. "A new parameter for classification and evaluation of railway ballast fouling". NRC Research Press.

infoescola, 2013. [www.infoescola.com](http://www.infoescola.com). [Online].

IT.GEO.001, 2008. Fornecimento de Balastro e Gravelha.

Jack, R. & Jackson, P., 1999. Imaging attributes of railway track formation and ballast using ground probing radar. Oxford, UK.

Liu, J. & Zhang, Q., 2012. Vehicle GPR in the maintenance of the high-speed railway - 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR).

Lourenço, V. L., 2012. Utilização do Radar de Penetração nos Solos (GPR) na detecção de estruturas no âmbito nas Ciências Forenses. "Ground Penetrating Radar for Forensic Applications". Universidade de Évora. Sociedade portuguesa de física.

NP EN 1097 - 6 (2003) Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados.

NP EN 13450 (2003) Agregados para balastro da via férrea.

NP EN 1936 (2001) Métodos de ensaio para pedra natural.

NP EN 581-1969 (1969) Inertes para argamassas e betões.

Nurmikolu, A., 2012. Key aspects on the behaviour of the ballast and substructure of a modern railway track: research-based practical observations in Finland.

Olhoeft, G. R. & Selig, E. T., 2002. Ground penetrating radar evaluation of railway track substructure conditions.

Pedrosa, M., 2009. Caracterização da Fundação de Infra-Estruturas de Transporte com recurso ao Georadar. Identificação das camadas de apoio. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto..

Peter, C. & Ulriksen, F., 1982. Application of impulse radar to Civil Engineering.

Pita, A. L., 2006. Temas de Transporte y Territorio - Infraestructuras ferroviarias.

REFER, E., 2001. VIV02 (EM 120) - Veículo de inspeção de via. Descrição dos sistemas de medição.

REFER, E., 2008. Curso formação em Engenharia ferroviária - Módulo 4 - Monitorização da Infra-estrutura Ferroviária.



- Roberts, R., Al-Qadi, L., Tutumluer, E. & Kathage, A., 2006. Ballast fouling assessment using 2 GHz horn antennas - GPR and ground truth comparison from 238 km of track.
- Rodrigues, D. D., 2012. Manutenção e conservação de vias férreas: análise de casos práticos. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Coimbra.
- Saarenketo, T., 2006. Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys. Tese de doutoramento. Linnanmaa.
- Selig, E. T. & Waters, J. M., 1994. Track geotechnology and substructure management.
- Shao, W. et al., 2011. Automatic Classification of Groun-Penetrating-radar Signals for Railway-Ballast Assessment.
- Silvast, M., Levomaki, M., Nurmikolu, A. & Noukka, J., 2006. NDT Techniques in Railway Structure Analysis.
- Su, L., Indraratna, B. & Rujikiatkamjorn, C., 2011. "Non-destructive assessment of rail track condition using ground penetrating radar". Melbourne, Australia.
- Sussmann, T. R. et al., 2001. Development of ground penetrating radar for railway infrastructure condition detection. Society of Exploration Geophysicists.
- The Finnish Geotechnical Society, 1992. Ground Penetrating radar: geophysical research methods, The Finnish Building Center. Finland.
- Ulriksen, P., 1982. *Application of impulse radar to civil engineering*. Lund: Lund University of technology, Doctoral Thesis.
- Vorster, D. J., 2012. The use of ground penetrating radar for track substructure characterization. Dissertação para a obtenção do grau de mester em Engenharia Civil.
- Yelf, R. J., 2007. Application of Ground Penetrating Radar to Civil and Geotechnical Engineering.